



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**EXPERIMENTÁLNÍ STAV PRO STANOVENÍ  
SPOTŘEBY MAZIVA V TURBODMYCHADLECH**

EXPERIMENTAL STAND FOR DETERMINATION OF TURBOCHARGER LUBRICANT  
CONSUMPTION

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Matej Kuhajdik**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.**

**BRNO 2019**



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Matej Kuhajdik**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Experimentální stav pro stanovení spotřeby maziva v turbodmychadlech**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Práce se zabývá problematikou spotřeby maziva v turbodmychadlech. V rámci práce se předpokládá konstrukční návrh a výroba jednoduchého zkušebního stavu umožňující stanovení spotřeby maziva při ustálených režimech.

#### **Cíle bakalářské práce:**

Rešerše mechanismů spotřeby maziva v přeplňovaných spalovacích motorech.  
Návrh koncepce technického experimentu.  
Konstrukční řešení včetně kompletní výkresové dokumentace.

#### **Seznam doporučené literatury:**

NGUYEN-SCHÄFER, Hung. Rotordynamics of Automotive Turbochargers. Second Edition. Ludwigsburg, Germany: Springer, 2015. ISBN 978-3-319-17643-7.  
STACHOWIAK, Gwidon W. a Andrew W. BATCHELOR. Engineering Tribology. 3. vyd. Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 0-7506-7836-4.  
HEISLER, Heinz. Advanced engine technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995. ISBN 1-56091-734-2.  
HAMROCK, Bernard J., SCHMID, Steven R. a JACOBSON, Bo. O. Fundamentals of fluid film lubrication. 2. vyd. New York: Marcel Dekker, 2004. ISBN 0-8247-5371-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 29. 10. 2018

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Táto práca rieši problematiku spotreby maziva v turbodúchadle a prefuku vzduchu z kompresorovej časti turbodúchadla do ložiskovej skrine. Zvolený problém je vyriešený návrhom skúšobného mechanizmu, ktorý bude použitý pri technickom experimente. Vytvorený experiment poskytuje možnosti analýzy použitého tesnenia rotora turbodúchadla GT35. Súčasťou práce je kompletná výkresová dokumentácia skúšobného zariadenia, postup montáže a návod na obsluhu zariadenia.

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

Turbodúchadlo, tesnenie, piestny krúžok, blow – by, spotreba, olej

## ABSTRACT

This work solves the problem of lubricant consumption in the turbocharger and air blow-by from the compressor part of the turbocharger into the bearing housing. The chosen problem is solved by the design of the test mechanism that will be used in the technical experiment. The experiment provides analysis options for the GT35 turbocharger rotor seal. Part of the work is a complete drawing documentation of the test equipment, installation procedure and instructions for operating the equipment.

## KEYWORDS

Turbocharger, seal, piston ring, blow-by, consumption, oil

## BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

KUHAJDIK, Matej. *Experimentální stav pro stanovení spotřeby maziva v turbodmychadlech*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117403>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.

## ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením doc. Ing. Pavla Novotného, Ph.D. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 22. mája 2019

.....

Matej Kuhajdik

## POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu mojej bakalárskej práce doc. Ing. Pavla Novotného, Ph.D. za cenné rady a pozitívny prístup počas celého priebehu práce. Zároveň firme JaNo s.r.o. za poskytnutie cenovej ponuky. Nakoniec chcem vyjadriť vďaku svojim rodičom a priateľke za neustálu podporu počas celého štúdia.



## OBSAH

Obsah .....	9
Úvod .....	11
1 Rešeršná časť práce .....	12
1.1 Základný popis turbodúchadla .....	12
1.1.1 Turbodúchadlo v pohonnej jednotke .....	12
1.1.2 Konštrukcia turbodúchadla .....	13
1.2 Ložiskový systém .....	15
1.2.1 Radiálne klzné (fluidné) ložiská .....	15
1.2.2 Axiálne klzné ložiská .....	17
1.2.3 Valivé ložiská .....	18
1.2.4 Vzduchové ložiská .....	20
1.3 Mazací systém .....	21
1.3.1 Chladenie vodou .....	21
1.3.2 Prechod maziva .....	22
1.3.3 Tesnenie .....	22
1.3.4 Olej .....	27
1.4 Poruchy .....	29
1.4.1 Poruchy v dôsledku zlého mazania .....	29
1.4.2 Porucha v dôsledku kontaminácie oleja .....	30
2 Analýza problému a cieľ práce .....	31
2.1 Analýza problému .....	31
2.2 Cieľ práce .....	31
3 Koncepčné riešenie .....	32
3.1 Koncept rotujúceho hriadeľa .....	32
3.2 Koncept nerotujúceho hriadeľa .....	33
3.2.1 Rozoberateľná skriňa .....	33
3.2.2 Masívna skriňa s použitím piestnych krúžkov .....	34
3.2.3 Koncept posuvu .....	34
4 Konštrukčné riešenie .....	35
4.1 Realizácia skúšobného mechanizmu .....	36
4.1.1 Skriňa .....	36
4.1.2 Hriadeľ .....	37
4.1.3 Príruba .....	37
4.2 Voľba tesnenia .....	38
4.3 Podstava .....	38
5 Konceptia priebehu technického experimentu .....	39
5.1 Postup montáže .....	39
5.2 Priebeh merania .....	40

5.2.1	Nastavenie axiálnej vôle .....	41
5.2.2	Meranie hodnoty prefuku vzduchu (Blow-by ) .....	42
5.2.3	Meranie hodnoty spotreby oleja .....	42
	Súhrn.....	43
	Záver .....	44
	Zdroje .....	45
	Zoznam použitých obrázkov .....	47
	Zoznam použitých symbolov .....	48
	Zoznam príloh .....	49

## ÚVOD

Turbodúchadlo je zariadenie, bez ktorého si v dnešnej dobe už nedokážeme predstaviť moderný spaľovací motor. Jeho hlavná funkcia sa v podstate nezmenila od čias švajčiarskeho inžiniera a vynálezcu Alfreda Büchi. Turbodúchadla sa používajú čím ďalej, tým častejšie najmä v osobných a nákladných automobiloch, lokomotívach, lietadlách, stavebných strojoch a lodiach.

Časť bežne nevyužiteľnej energie prúdiacich spalín atmosférického motora využijeme u preplňovaného motora na chod kompresorového kola. Po zväčšení hmotnosti stlačeného vzduchu vo valcoch motora, ktorý je dopravovaný z kompresora, sa úmerne zväčší podiel vstrekaného paliva. Týmto mechanizmom zvyšujeme výkon motora, znižujeme emisie a mernú spotrebu paliva.

Na dosahovanie plniacich tlakov sú potrebné vysoké otáčky rotora turbodúchadla, ktorý je uložený zväčša na klzných ložiskách. Ložisková sústava by bez dômyselného chladenia dosahovala nežiadúce vysoké teploty. Chladiacim médiom je motorový olej, ktorý je cez kanáliky dopravovaný pod tlakom. Výrobcovia motorov kladú dôraz na znižovanie spotreby maziva pri prevádzke turbodúchadla, ktorej minimálne hodnoty majú určité obmedzenia z dôvodu využívania bezkontaktného tesnenia na rozhraní ložiskovej skrine a skrine kompresora/turbíny.

Rešeršná časť práce sa zaoberá uvedením funkcie turbodúchadla v pohonnej jednotke, jeho časťami a zhrnutím doterajších poznatkov v oblastiach, ktoré súvisia s mazivom. Primárne v oblasti ložísk, vlastností oleja, porúch v dôsledku zlého mazania a odtesnenia rotora, ktoré priamo súvisia s nežiadúcimi stavmi ako sú prefuky vzduchu a únik maziva cez tesnenie rotora.

Únik maziva má ekonomický a ekologický vplyv počas chodu turbodúchadla, prefuky negatívne ovplyvňujú emisie, výkonnosť a efektívnosť turbodúchadla.

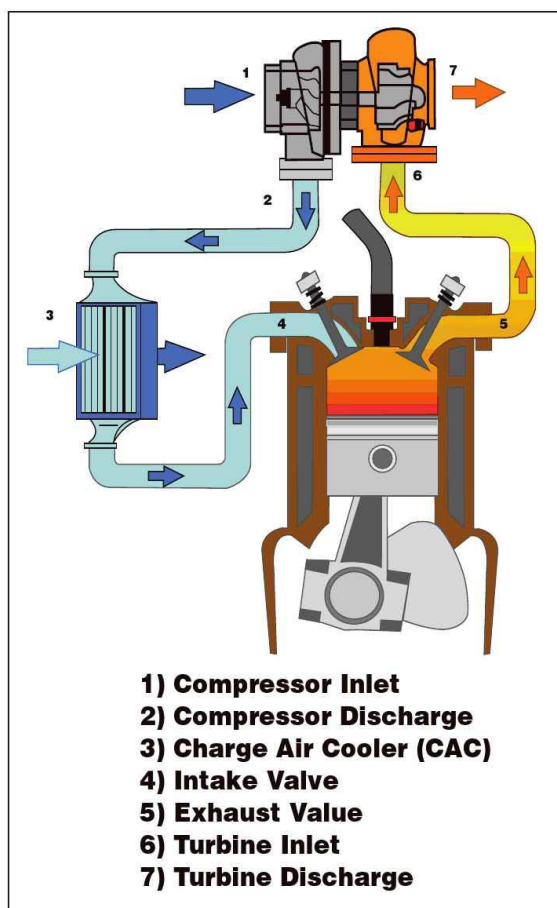
# 1 REŠERŠNÁ ČASŤ PRÁCE

## 1.1 ZÁKLADNÝ POPIS TURBODÚCHADLA

### 1.1.1 TURBODÚCHADLO V POHONNEJ JEDNOTKE

Prestup vzduchu cez valce motora, turbodúchadlo a chladič je znázornený na obr. 1.1. Spalinami (5) poháňaná turbína (7) prenáša krútiaci moment na kompresor (1), ktorého lopatky nasávajú vzduch, ktorý je postupne v kompresorovej skrini stláčaný. Pri kompresnom pomere  $\pi_c=3$  a priemernej účinnosti kompresora 75% dosahuje vzduch (2) opúšťajúci kompresor teplotu až 165°C [1]. Z tohto dôvodu je horúci vzduch chladený v chladiči (3), aby vzduch (4) dopravovaný do valca motora mal čo najmenší merný objem.

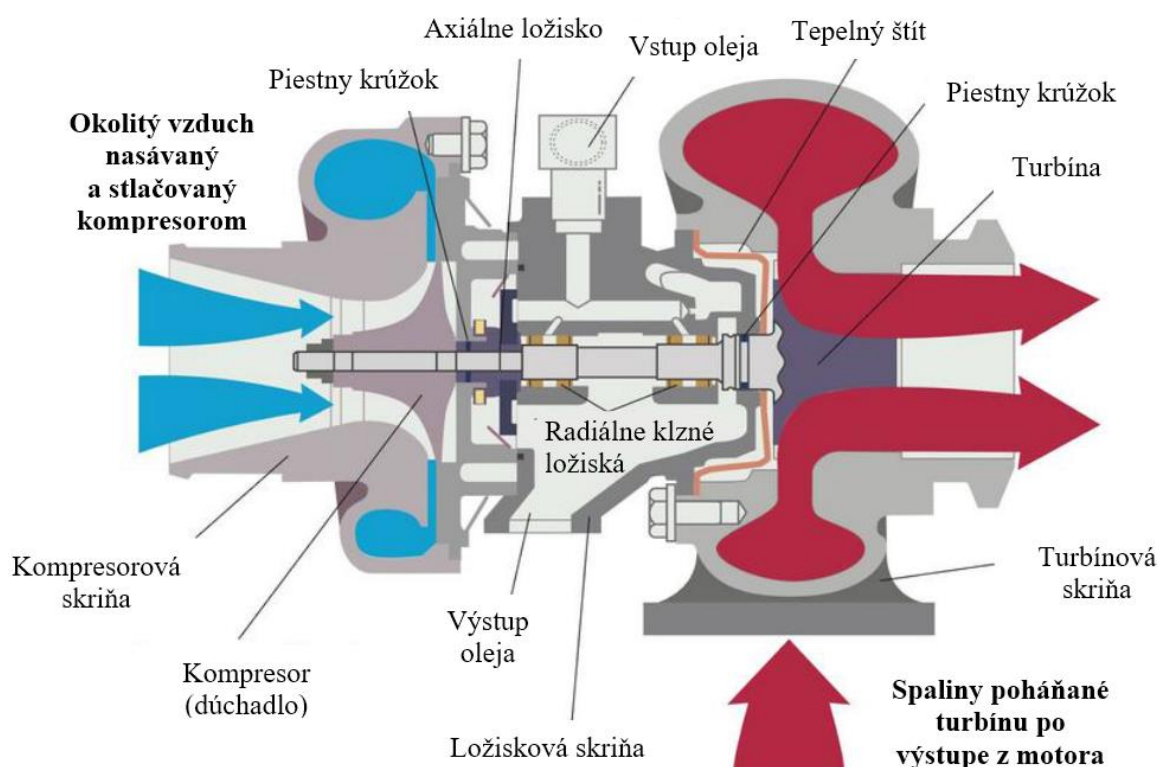
Zvýšením hmotnosti plniaceho vzduchu a teda aj hmotnosti kyslíka sa dosiahne v spaľovacom priestore možnosť spálenia väčšieho množstva paliva, čím sa u preplňovaného motora zvýši výkon a krútiaci moment v porovnaní s rovnakým zdvihovým objemom u atmosférického motora. Turbodúchadlo využitím energie zo spalín zvyšuje celkovú efektivitu pohonnej jednotky pripísaním len nepatrnej hmotnosti a rozmerov.



Obrázok 1.1 Cirkulácia vzduchu v pohonnej jednotke [2]

### 1.1.2 KONŠTRUKCIA TURBODÚCHADLA

Trh ponúka široký sortiment turbodúchadiel, ktorý bol dôkladne navrhnutý vzhľadom k cene a parametrom motorov, ku ktorým sa inštalujú. Konštrukčne sa radia medzi vysokootáčkové lopatkové stroje dosahujúce otáčky v automobilovom priemysle od 150 000 do 350 000 ot/min [1]. Turbodúchadlo sa skladá z troch hlavných častí, ktoré sú farebne vyznačené na obr. 1.2. Sprava: turbínová skriňa, ložisková skriňa a kompresorová skriňa.



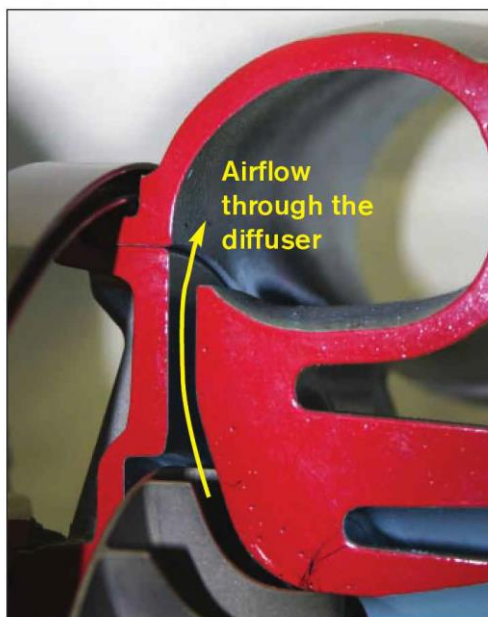
Obrázok 1.2 Časti turbodúchadla [3]

Plyny z motora prechádzajúce výfukovými zvodmi prichádzajú do turbínovej skrine o teplote od 750°C do 1050°C [4]. Kvôli týmto vysokým teplotám sa volia najčastejšie materiály:

- Pre dieslové motory: GGGX-SiMo51 a pre vyššie teploty do 850°C GGG NiCr 20 2
- Pre benzínové motory: GGG NiCr 35 5 2 odolávajúci teplotám do 1050°C. [4]

Ložisková skriňa nachádzajúca sa uprostred, v tesnej blízkosti turbínovej skrine, podlieha vysokým teplotám, a preto je zabezpečená tzv. tepelným štítom. Tepelný štít, ako je vidieť na obr. 1.2, vytvára dutinu so vzduchom. Zabráni sa tak varu oleja, ktorý prúdi v ložiskovej skrini a následnému treniu stykových plôch pohyblivých častí [4]. Pri vare oleja a následnom prepálení by dochádzalo k vzniku tuhších častíc, ktoré by sa usadzovali v oblasti výstupu. Tieto usadeniny majú potenciál obmedziť alebo zabrániť prietoku oleja. Postupne by mohlo dôjsť k úniku maziva cez piestne krúžky alebo iné tesnenie rotora turbodúchadla, ktoré majú za úlohu oddeľovať priestor ložiskovej komory od kompresorovej a turbínovej. Po vstupe do ložiskovej komory sa olej pod tlakom rozchádza do jednotlivých kanálikov zásobujúcich radiálne a axiálne ložiská, ktoré následne voľne opúšťa a steká do olejového výstupu.

Kompresorová skriňa slúži na nasatie vzduchu cez vstup a následnému radiálnemu zrýchleniu na vysokú rýchlosť. Obsahuje radiálny difúzor, v ktorom sa zníži rýchlosť, narastie teplota a tlak. Tento vzduch sa zbiera v najširšej časti, anglicky: volute. V dnešnej dobe sa na jej výrobu používa najmä hliník a magnézium[4]. Hliníkové odliatky sa používajú aj pri výrobe rotora kompresora, ktoré sú následne opracované. Akceptované obvodové rýchlosti dosahujú hodnoty okolo 550 m/s. Pokiaľ sa zredukuje požadovaná životnosť, dosahuje sa aj vyšších rýchlostí [4]. Tlak v kompresorovej komore dosahuje od 40 do 172 kPa [5] u turbodúchadla Garrett série GT35.

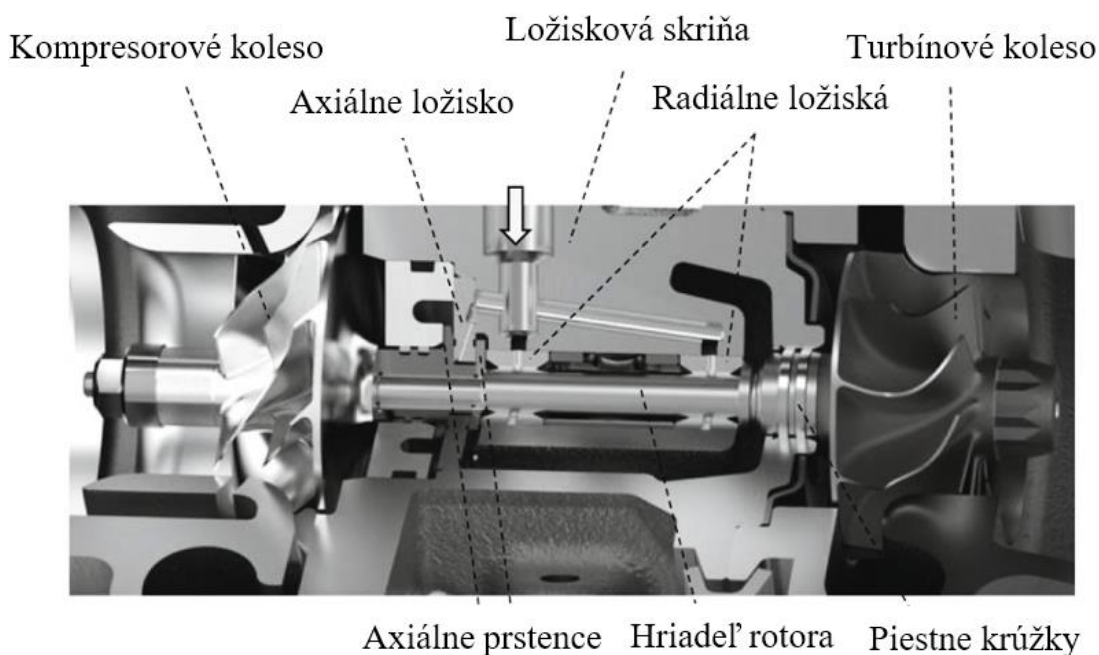


Obrázok 1.3 Detail difúzora a „volute“ v kompresorovej skrini [2]

Uloženie kolesa turbíny a kompresora priamo ovplyvňuje mieru vytesnenia ložiskovej skrine od kompresorovej a turbínovej. Pri návrhu sa uvažuje o medzere medzi zadnou plochou kolesa a ložiskovou skriňou tak, aby bol tlak medzi ložiskovou komorou a kolesom kompresora čo najbližší k tlaku ložiskovej komory a zároveň turbodúchadlo pracovalo čo najefektívnejšie.

## 1.2 LOŽISKOVÝ SYSTÉM

Ložiskový systém zohráva kľúčovú úlohu v plynulom chode turbodúchadla. Zabezpečuje odolávanie radiálnym a axiálnym silám s nízkym trením v rôznych prevádzkových štádiách. Ako je naznačené na obr. 1.4, ložiskový systém nachádzajúci sa v centrálnej ložiskovej skrini zahŕňa: hriadeľ rotora, turbínové a kompresorové koleso, radiálne a axiálne ložiská. V prvom prípade impulzné sily od tekutín a tlaky na turbínu/kompresor vytvárajú axiálne ťahové zaťaženie, ktoré sa líši od intenzity zaťaženia turbodúchadla. Axiálne zaťaženie je kompenzované axiálnymi ložiskami a udržiava rotor v stabilnej polohe v axiálnom smere. V druhom prípade radiálne ložiská vyvolávajú ložiskové sily slúžiace na vyváženie nevyvážených síl, ktoré účinkujú na rotor v radiálnom smere. [1]



Obrázok 1.4 Uloženie rotora v klzných ložiskách [1]

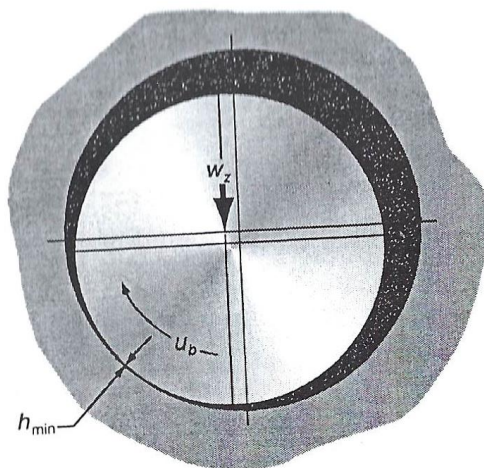
### 1.2.1 RADIÁLNE KLZNÉ (FLUIDNÉ) LOŽISKÁ

Klzné ložiská sú najrozšírenejším uložením rotora turbodúchadla. Ich hlavnými charakteristickými znakmi sú najmä vysoká životnosť, nízke až žiadne opotrebenie v priaznivých podmienkach, nízka hlučnosť a relatívne nízka cena. Aplikujú sa v automobilovom priemysle pre redukciu amplitúdy rotora pri kmitaní [1]. Klzné ložiská sa používajú v masovo produkovaných turbodúchadlách, kde sa využijú ich výhody zväčša pri aplikácii turbodúchadiel v pohonných jednotkách kamiónov (rotor turbodúchadla dosahuje životnosť do 1 milióna km) [4].

Využívajú hydrodynamické mazanie, ktoré je znázornené na obr. 1.5. Minimálna hrúbka vrstvy maziva je funkciou aplikovaného zaťaženia ložiska  $w_z$ , obvodovej rýchlosti hriadeľa  $u_b$ , viskozity maziva  $\eta_0$ , a geometrie  $R_x$  a  $R_y$ . Minimálna hrúbka vrstvy maziva zvyčajne dosahuje 1  $\mu\text{m}$  [6].

Funkcia minimálnej hrúbky maziva v ložisku pri hydrodynamickom mazaní [6]:

$$(h_{min})_{HL} \propto \left(\frac{u_b}{w_z}\right)^{1/2} \quad (1)$$



Obrázok 1.5 Charakteristika hydrodynamického mazania [6]

### Porovnanie typov radiálnych klzných ložísk:

Zaužívané sú dva typy klzných ložiskových puzdier a to **zastavené plávajúce puzdrá** a **rotujúce plávajúce puzdrá**. Spoločným znakom sú dve olejové vrstvy filmu nachádzajúcich sa zvnútra a zvonku puzdier. Avšak hlavný rozdiel nastáva pri relatívnom pohybe puzdier vzhľadom k ložiskovej skrini. Zastavené plávajúce puzdro je opatrené pinom zamedzujúci rotáciu puzdra, a preto je relatívny pohyb voči ložiskovej skrini nulový. Preto v ložisku so zastaveným plávajúcim puzdrom je hydrodynamické mazanie len na vnútornej ploche (medzi puzdrom a hriadeľom rotora), ale pri rotujúcom dva hydrodynamické olejové filmy (medzi puzdrom a ložiskovou skriňou, medzi puzdrom a hriadeľom rotora) [7].

Riešenie zastaveného plávajúceho puzdra ložiska má nižšie produkčné náklady, šetrí rozmery (kratšia celková dĺžka turbodúchadla) a sú potrebné nižšie tlaky v mazacej sústave [4]. Avšak zastavené plávajúce puzdro ložiska dosahuje vyššie hodnoty trenia ako rotujúce plávajúce puzdro ložiska a to o 20% pri nízkych otáčkach, približne 90 000 ot/min [1]. Z toho vyplýva, že rotujúce puzdro oproti zastavenému znižuje reakčný čas turbodúchadla a znižuje sa tak nežiadúca vlastnosť turbodúchadla, tzv. turbolag.

Rotor turbodúchadla rotuje v ložiskách bez opotrebenia vďaka tenkému filmu oleja, ktorý oddeľuje trecie povrchy. Rotujúce plávajúce puzdro dosahuje otáčky vzhľadom k ložiskovej skrini do hodnoty 50% otáčok hriadeľa rotora [4]. Pre neustále potrebný prechod maziva klzným puzdrom sa do puzdier vrtajú otvory. Klzné puzdrá sú uložené napríklad s priemernou nominálnou vôľou  $20 \mu\text{m} \pm 6 \mu\text{m}$  [1]. V porovnaní so zastavenými klznými puzdrami, rotujúce dosahujú nižšiu mieru excentricity oscilácie hriadeľa vplyvom lepších tlmiacich vlastností [8].

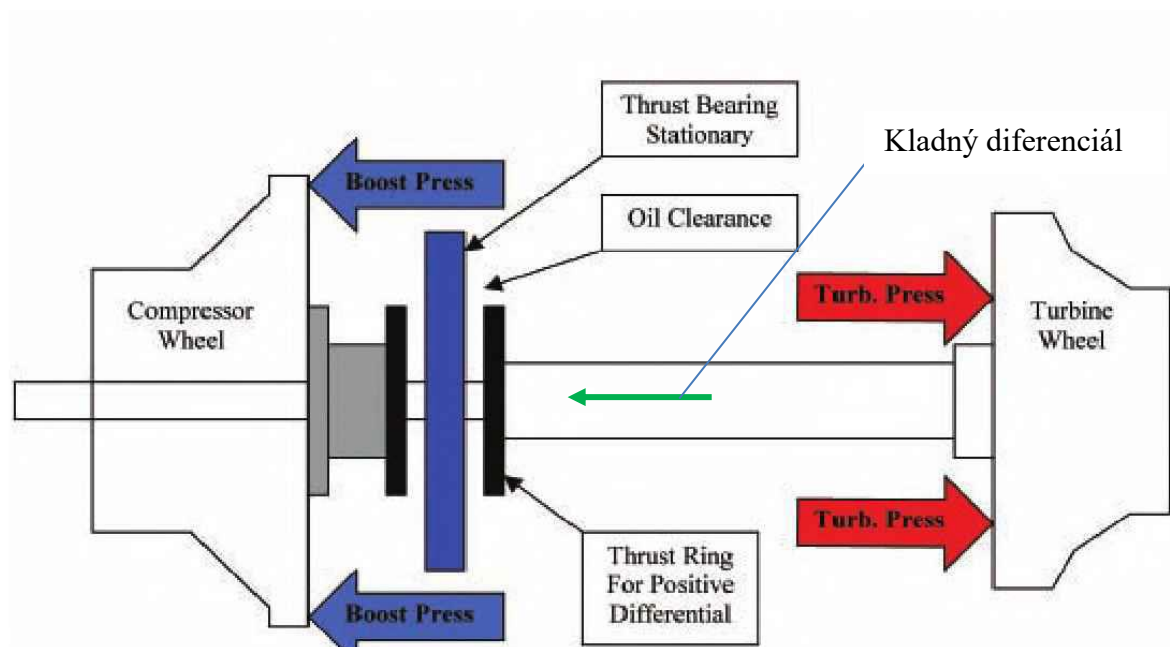




Obrázok 1.6 Rotujúce plávajúce puzdrá (hore) a zastavené plávajúce puzdrá (dole) klzného ložiska [9]

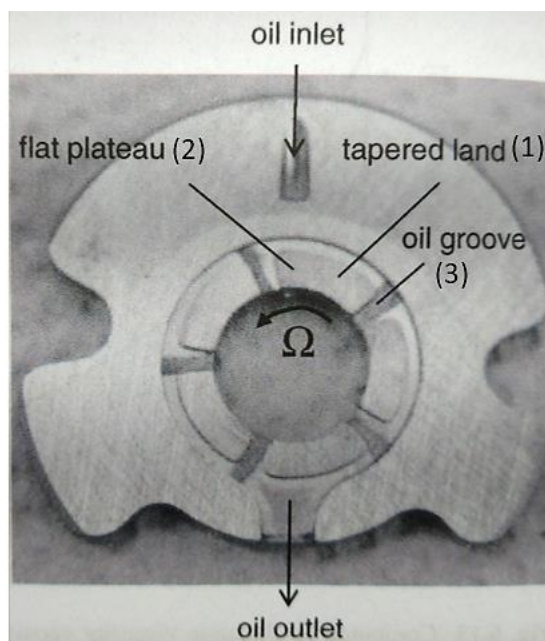
### 1.2.2 AXIÁLNE KLZNÉ LOŽISKÁ

Okrem radiálnych síl pôsobiacich na rotor turbodúchadla je nutné kompenzovať axiálne sily, ktoré vznikajú tlakovým diferenciálom z tlaku pôsobiaceho na zadné steny kolesa turbíny a kompresora. Pri akcelerácii vozidla bude tlak v turbíne väčší ako tlak v kompresore a hovoríme o negatívnom diferenciály a naopak [2]. Tlaky pôsobiace na zadné steny turbíny a kompresora spolu so smerom kladného tlakového diferenciálu sú znázornené na obr. 1.7.



Obrázok 1.7 Znázornenie axiálnych tlakov pôsobiacich v turbodúchadle [2]

Ložiskový segment obsahuje zúženú (skosenú) plochu (1), plochú plošinu (2) a olejovú drážku (3) ako je vidno na obr. 1.8. Je namontovaný a zafixovaný v ložiskovej skrini. Axiálne prstence vytvárajúce axiálne zaťaženie na ložiskový segment a sú zafixované k rotoru turbodúchadla. Pri rotácii rotora a axiálnom zaťažení ložiska je vôľa dosahujúca stotín milimetra medzi ložiskovým segmentom a axiálnym prstencom vyplnená olejom. Princíp práce axiálneho ložiska je založený na hydrodynamickom efekte mazacieho oleja [1]. Súčasť dopĺňajúca axiálne ložisko je plechový kryt, ktorý zabezpečuje odrážanie oleja, aby sa nedostal k tesneniu hriadeľa [4].



Obrázok 1.8 Axiálne klzné ložisko s popisom segmentu [1]

Axiálne ložisko s mnohými segmentami je väčšinou vyrábané z mosadze (žltkastá zliatina medi a zinku obsahujúca malé množstvo mangánu a hliníka). Mosadz nemá najlepšie tribologické vlastnosti, ale má výbornú tepelnú vodivosť, redukuje opotrebenie a odstraňuje tepelný tok vznikajúci ložiskovým trením. [1]

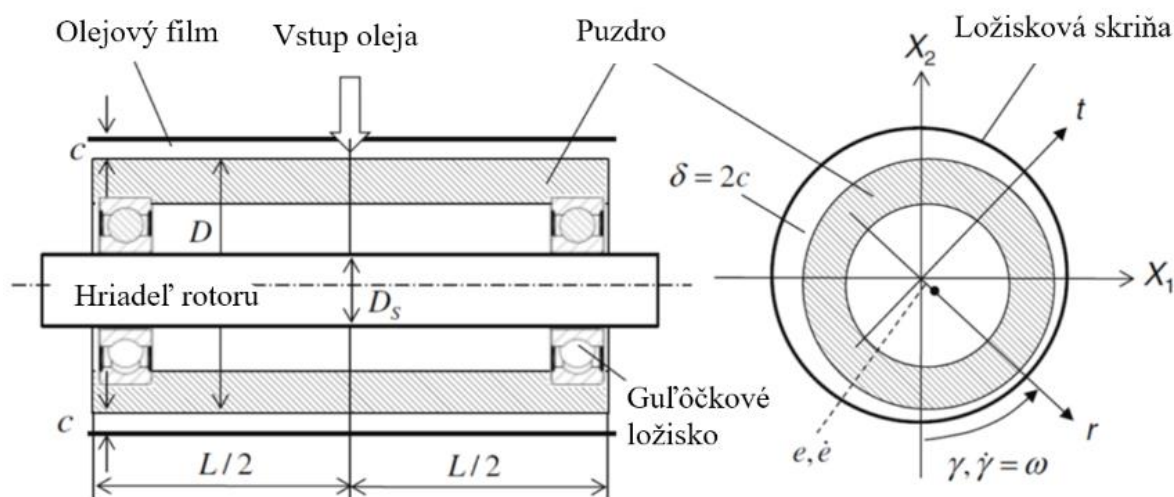
### 1.2.3 VALIVÉ LOŽISKÁ

Valivé ložiská v nedávnej minulosti tvorili ojedinelú súčasť turbodúchadiel závodných automobilov. V súčasnosti sa inovatívne valivé ložiská inštalujú do moderných osobných automobilov s cieľom zvýšiť efektívnosť turbodúchadla. To znamená znížiť trecie sily pri nižších otáčkach, a tým pádom aj reakčný čas turbodúchadla. Valivé ložisko má využitie najmä vo výkonných turbodúchadlách s variabilnou geometriou lopatiek, vďaka ktorým sa dokáže turbodúchadlo presnejšie naladiť k danému motoru [7]. Kvôli vysoko-cyklovej únave musia byť pre výrobu valivých ložísk použité kvalitné materiály s dôkladným dodržaním nízkych tolerancií vo výrobe. Pre moderné valivé ložiská sa používajú keramické materiály, ktoré sú charakteristické svojou vysokou odolnosťou voči vysokým teplotám do 1073 K [10].



Obrázok 1.9 Gulôčkové ložisko s kosouhlým stykom [11]

Trh ponúka viac druhov valivých ložísk, ale v turbodúchadlách pre automobilový priemysel sa používajú len tieto dve: gulôčkové ložiská s kosouhlým stykom a rovné valčekové ložiská. Dôležitou vlastnosťou valivých ložísk je ich funkčnosť v radiálnom a axiálnom smere. Gulôčkové ložiská majú dostatočné množstvo spomenutých výhod, a preto sa ich vývojári snažia presadiť v uložení značného množstva rotorov turbodúchadiel. Avšak takéto riešenie skrýva hneď aj niekoľko nevýhod. Gulôčkové ložiská s kosouhlým stykom neobsahujú vnútorné tlmenie kvôli veľmi malým rozmerovým toleranciam. Preto musí byť pridaný prídavný tlmiaci mechanizmus – olejový film (viď detail rezu ložiskom na obr. 1.10), ktorý potlačí amplitúdu rotora pri rezonanciách a zredukuje nežiaduce zvuky. Dva hlavné dôvody prečo sa valivé ložiská nepoužívajú v menších turbodúchadlách je vysoká cena vzhľadom ku klzným ložiskám a tiež životnosť limitovaná vysoko–cyklovou únavou. Majú tiež väčšie rozmery (približne dva krát objemnejšie) a väčšie opotrebenie pri vyšších rýchlostiach. [1]



Obrázok 1.10 Rez valivého ložiska [1]

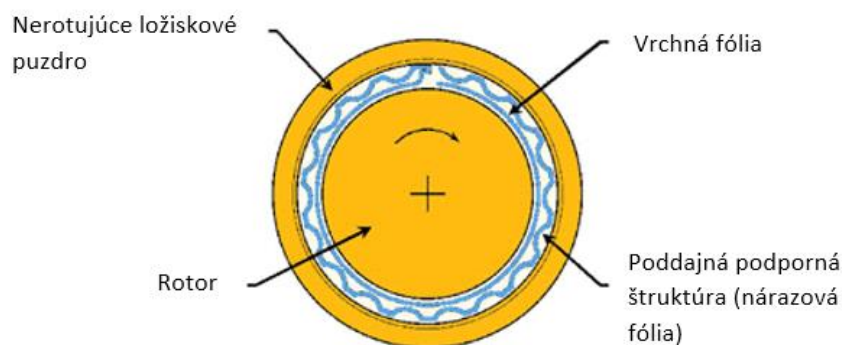
### 1.2.4 VZDUCHOVÉ LOŽISKÁ

Spoločnosti zaoberajúce sa výrobou a konštrukciou turbín, turbodúchadiel a riešením ložiskových uložení rotora sa zaoberajú vývojom bezolejových ložísk. Ložiská využívajúce vzduch ako lubrikant majú potenciál nielen zlepšiť reakčný čas turbodúchadla ale aj znížiť váhu v leteckých aplikáciách odstránením príslušenstva na mazanie klzných ložísk. [12]

Vzduchové ložiská pracujú na rovnakom princípe ako hydrodynamické. Ich základnou vlastnosťou je podstatne nižšia viskozita vzduchu ako oleja. So zvyšujúcou sa teplotou sa len mierne zvyšuje viskozita vzduchu. Z toho vyplýva možnosť využitia vzduchom mazaných ložísk od vysokých až po nízke teploty. Naopak, kvôli nízkej viskozite a kompresného charakteru vzduchu majú vzduchové ložiská nižšiu tuhosť a tlmiace vlastnosti. Vzhľadom k vysokej abrázii pri akcelerácii, decelerácii, štarte a zastavení obsahuje ložisko veľmi tenkú fóliu odolávajúcu opotrebeniu plôch ložiska. Rotor je plne nadnášaný vzduchom približne od 2 000 ot/min. [13]

Najväčší dôraz pri vývoji sa kladie na použitú vrstvu fólie, ktorá limituje rozsah využitia ložiska. Donedávna bol limitujúci strop teploty pod 300 °C. Avšak vedci z NASA Glenn Research Center vyvinuli nové povrchy povlakov, ktorých teplotný strop sa zvýšil na 650 °C. Jedným z nich bol samolubrikujúci kompozit obsahujúci oxid chromitý. Pri testovaní povlaku v turbodúchadle v preplňovanom motore s výkonom 112 kW dosiahol lubrikant 100 000 cyklov štartu a vypnutia motora. Na vstupe do turbíny bolo približne 650 °C a 2,5-krát vyššie normálne statické zaťaženie. Doterajšie testované turbodúchadlá dosahovali približne 121 500 ot/min. [12]

Vzduchové ložiská pokryté odolnými fóliami majú kvôli požadovanej vysokej presnosti pri výrobe a použitých materiáloch vysoké výrobné náklady. A práve aj preto nie sú také atraktívne pre výrobcov.



Obrázok 1.11 Rez vzduchového ložiska [14]

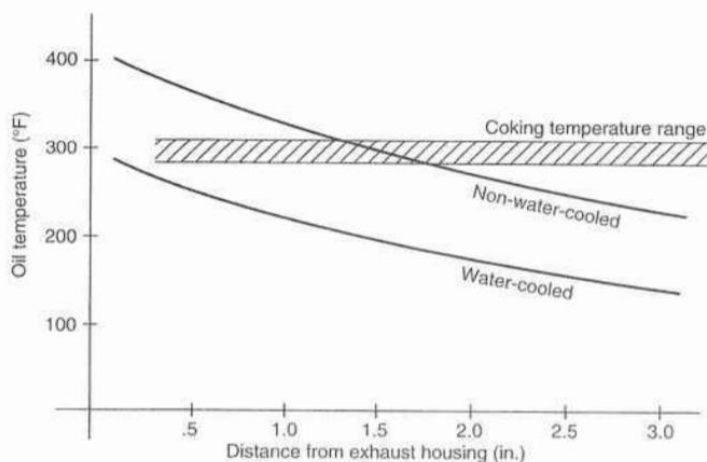
### 1.3 MAZACÍ SYSTÉM

Turbodúchadlo ako vysokootáčkový mechanizmus kladie vysoké nároky na chladenie a mazanie pohyblivých častí. Túto funkciu zabezpečuje motorový olej, ktorý je privádzaný olejovými kanálkami k ložiskám rotora turbodúchadla. Olej je dopravovaný čerpadlom pod tlakom. Pri štartovaní motora olej v predstihu 3 – 4 sekúnd pred zapálením paliva v motore dosiahne vstupu mazacích kanálikov v ložiskovej skrini turbokompresora. Tlak oleja pri voľnobehu motora by nemal klesnúť pod 0,7 bar. Pri záťaži motora olej dosahuje minimálny tlak 2 bary a nemal by presiahnuť 4 bary, inak by mohol olej prenikať cez piestne krúžky k zadnej stene turbíny alebo kompresora. [15]

Olej opúšťajúci ložiská už nie je pod vysokým tlakom a postupne steká do olejovej vane. Vplyvom vysokej rotácie rotora, prefuku vzduchu a spalín z kompresorovej a turbínovej skrine sa vytvorí zmes vzduchu a oleja. Kvôli tepelnej expanzii vzniká pena, ktorá je výraznejšia pri osciláciách rotora s vyššími otáčkami. Pena má vyššiu viskozitu, a preto má výstup oleja väčšie rozmery v porovnaní so vstupom. Prietok oleja pri plnej záťaži konvenčného turbodúchadla dosahuje minimálne 1,9 l/min [16].

#### 1.3.1 CHLADENIE VODOU

Teplota oleja sa líši od konštrukcie turbodúchadla. Môže byť vybavené chladením vodou ale aj nemusí. Vodou chladená ložisková komora sa využíva najmä pri motoroch s benzínovým palivom, kde teplota spalín dosahuje aj o 200 – 300 °C viac ako pri naftových motoroch. V tomto prípade je ložisková komora zahrnutá do chladiaceho okruhu motora [4]. V grafe na obr. 1.12 je znázornená závislosť teploty oleja vzhľadom k vzdialenosti od turbínovej skrine pre turbodúchadlo nechladené a chladené vodou.



Obrázok 1.12 Závislosť teploty oleja a vzdialenosti od skrine turbíny, pre turbodúchadlo nechladené a chladené vodou [16]

Je evidentné, že pri určitej vzdialenosti od turbíny dochádza k varu, degradácii a prepaľovaniu oleja, ktorý zapríčiní horšiu cirkuláciu lubrikantu, a tým zníži životnosť turbodúchadla. Samozrejme po čase každý olej určený na prevádzku pri vysokých teplotách degraduje. Ale v porovnaní s atmosférickými motormi sa v preplňovaných s chladením vodou v turbodúchadle mierne skracujú intervaly výmeny oleja.

### 1.3.2 PRECHOD MAZIVA

Hadice a potrubia zabezpečujúce prívod a odvod oleja z ložiskovej komory turbodúchadla späť do motora sú pravdepodobne najslabšou stránkou celej schémy prepĺňania. Kladené nároky sú na vysokú odolnosť voči tlaku, teplote (2-násobná maximálna teplota oleja) a uhl'ovodíka. [16]

Aj vplyvom poškodenej hadice môže dôjsť ku strate oleja. Keď začne unikať olej, väčšinou je príčina práve teplota cirkulovaného oleja. Počas cirkulácie sa gumový materiál hadice vytvrdzuje a postupne stáva krehkejšim. Nakoniec sa stane tak krehká, že aj malá zmena polohy či tlaku oleja v hadici spôsobí trhlinu. Vytvrdzovanie vplyvom tepla sa nedá ovplyvniť, ale následky sa dajú minimalizovať viacerými opatreniami:

- použitím kvalitných, vysokoteplotných hadíc adekvátnych k tlaku v olejovom systéme. V pohonných jednotkách dosahujúcich extrémne teploty môže byť použitá teflonová hadica.
- periodickými kontrolami sa kontroluje vznik prasklín a flexibilita hadice (vytvrdená hadica pri ohybe popraská). Pri náznaku nedostatku sa hadice vymenia.
- výmenou hadíc vykazujúcich únik oleja. V prípade zanedbania tohto opatrenia, vplyvom straty oleja v danej linke hrozí zadrhnutie piestu, čerpadla, ložiska.
- pred výmenou je nutné sa uistiť, že vymieňaná hadica má minimálne rovnaké alebo lepšie parametre (pevnosť, teplotná odolnosť), rovnaké rozmery ako originál (priemer, dĺžka). Používajú sa dostatočné remienky a svorky na zabránenie odierania.
- udržiavaním hladiny oleja na odporúčanej hladine. Nedodržanie správnej hladiny oleja môže viesť k prevzdušneniu. Kombinácia kyslíka a vysokej teploty urýchlíuje vytvrdnutie vnútornej vložky hadice. Prevzdušený olej môže tiež spôsobiť vážne poškodenie komponentov. [17]

### 1.3.3 TESNENIE

Kvôli funkčnosti a efektívnosti musí byť v rotorovej časti na strane turbíny a kompresora tesnenie. Zohráva dve dôležité tesniace úlohy. Prvou je obmedzenie toku oleja z ložiskovej komory do priestoru turbíny a kompresora. Ďalšou úlohou je obmedzenie prietoku vzduchu a spalín, tzv. blow-by, z priestoru kompresora/turbíny do ložiskovej komory.

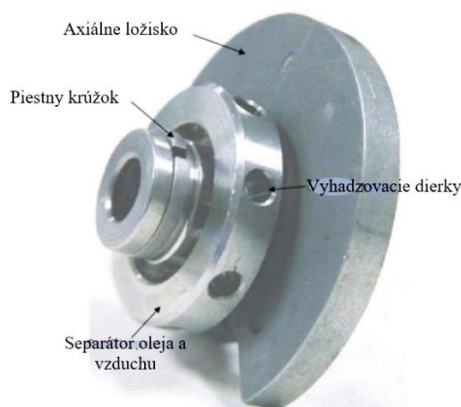
Tesnenie na rozhraní turbínovej skrine je relatívne ľahko dosiahnuteľné vďaka stálemu pozitívnemu gradientu tlaku medzi priestorom turbíny a ložiskovej komory. Naopak tesnenie na strane kompresora je už zložitejšie vplyvom premenlivého tlakového gradientu. Pri určitých stavoch v turbodúchadle nastáva pokles tlaku v kompresorovej skrini, napr.:

- vírením nasávaného vzduchu medzi zadnou stenou kola kompresora a skrine,
- poklesom tlaku kvôli vzduchovému filtru,
- v nízkotlakovom režime pri nepreplňujúcich periódach, keď kompresor nie je v činnosti (motor vo voľnobehu alebo v nízkych otáčkach).

Vplyvom týchto stavov sa tvorí vákuum v oblasti zadnej strany kola kompresora [8]. Tento mechanizmus výrazne ovplyvňuje spotrebu maziva v turbodúchadle. Podtlak má tendenciu nasáť olej cez tesnenie z ložiskovej skrine. Následne nasatý olej sa rozplynie v nasávanom a stlačovanom vzduchu, ktorý je dopravený do valcov motora, kde nakoniec zhorí.

Jedným riešením tohto problému je použitie dynamického olejového tesnenia využívajúce odstredivú silu na odstránenie oleja z rotora. Tento prvok (viď obr. 1.13) obmedzí tok oleja napr. k piestnemu krúžku, ktorý následne stečie do výstupu. Nachádza sa v tesnej blízkosti axiálneho ložiska, prípadne je jeho súčasťou. Obsahuje dierky, v ktorých sa z olejovej peny vplyvom odstredivých síl odseparuje olej od vzduchu.





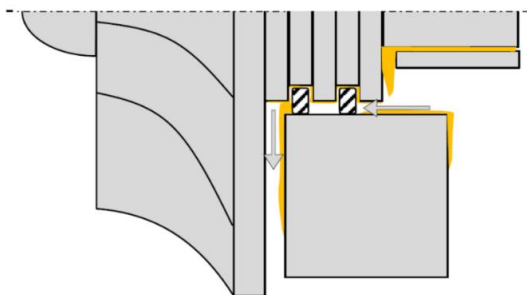
Obrázok 1.13 Separátor oleja a vzduchu s klzným ložiskom [8]

Moderné turbodúchadlá pracujú vo veľmi vysokých otáčkach (do 300 000 ot/min), preto je prioritou vybrať tesnenie, ktoré bude v čo najväčšej miere spĺňať funkčnosť a zároveň bude mať čo najnižšie trecie straty. Tieto kritéria spĺňa bezkontaktné tesnenie a medzi najpoužívannejšími sú piestne krúžky a labyrintové tesnenie. Avšak tento druh tesnenia nedokáže stopercentne odtesniť priestory uloženia rotora, a tým zabezpečiť nulovú spotrebu maziva.

### PIESTNE KRÚŽKY

V dnešnej dobe v masovo produkovaných turbodúchadlách je rotor vybavený jedným až dvomi piestnymi krúžkami na každej strane. Uložia sa do drážky na hriadieli s veľmi malými axiálnymi vôľami. Piestny krúžok vzhľadom k ložiskovej skrini nerotuje ale je pevne držaný. Táto forma tesnenia je bezkontaktná. Piestne krúžky nachádzajú uplatnenie vo väčšine radiálnych turbodúchadiel, ktoré je napr. zobrazené na obr. 1.2.

V určitých podmienkach a režime turbodúchadla spomenutých v kap. 1.3.3. nastáva stav, kedy olej prechádza cez piestne krúžky a naopak zas vzduch/spaliny z kompresorovej/turbínovej komory. Tento stav je znázornený na obr. 1.14.



Obrázok 1.14 Prienik maziva cez piestne krúžky [18]

Ani piestny krúžok nedokáže zabezpečiť absolútnu tesnosť, kvôli uloženiu s vôľami rádovo stotín milimetra v axiálnom smere. Napriek tomu sú piestne krúžky najpoužívannejšou voľbou konštruktérov k utesneniu rotora turbodúchadla. Vyznačujú sa výhodami ako:

- jednoduchá výroba,
- relatívne nízka cena,
- kompaktné rozmery,
- odolnosť v agresívnom prostredí
- Jednoduchá výmena

K prieniku média cez piestne krúžky dochádza dvomi spôsobmi. Buď cez zámok krúžku, ktorý slúži na inštaláciu krúžku na hriadeľ, alebo cez medzeru existujúcu medzi bokami drážky pre krúžok a stenami krúžku. Táto medzera je axiálna vôľa, ktorá je v rozsahu niekoľkých stotín. V prípade novej generácie série turbodúchadiel GT35 je to približne 40  $\mu\text{m}$  z každej strany. Krúžok je uložený v hriadeľi nielen s axiálnou vôľou, ale aj s radiálnou, ktorá je výraznejšia. V spomínanej sérii dosahuje približne 700  $\mu\text{m}$ . Radiálna vôľa je výrazná kvôli vibráciám, ktorými je charakteristický rotor pri vyšších záťažach, ale aj vzhľadom k tomu, že radiálna vôľa nemá významný vplyv na tok média.

Hmotnostný tok vzduchu cez zámok krúžku sa dá popísať prúdením ideálneho plynu malým otvorom. V prvom rade je potrebné určiť, či ide o prúdenie podkritické alebo kritické. Charakter prúdenia určujeme z konštanty tlakového pomeru  $\beta$ . Ak je  $\beta > \beta_k$ , tak ide o podkritické prúdenie. Pričom platí [19]:

$$\beta_K = \frac{p_K}{p_1} = \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (2)$$

a

$$\beta = \frac{p}{p_1}, \quad (3)$$

kde  $p$  je tlak,  $\kappa$  je polytropický exponent.

Potom hmotnostný tok podkritického prúdenia dokážeme popísať rovnicou [19]:

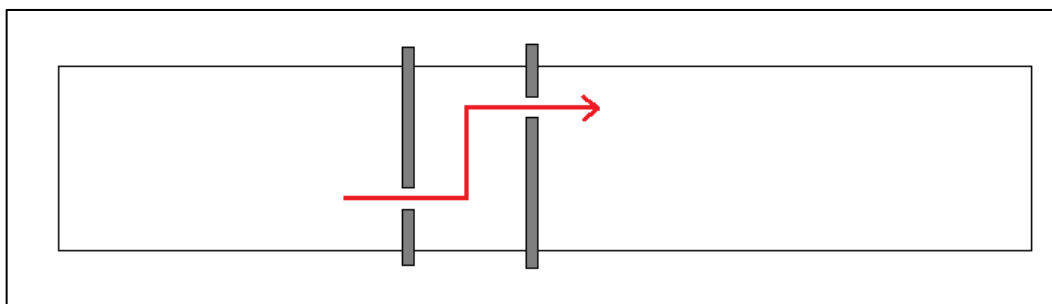
$$\dot{m} = S \sqrt{\frac{p_1}{v_1}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left[ (\beta)^{\frac{2}{\kappa}} - (\beta)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]}, \quad (4)$$

kde  $S$  je účinný prierez,  $v$  je merný objem plynu.

Ak  $\beta < \beta_k$ , prúdenie otvorom je kritické a plyn dosahuje maximálnu rýchlosť – rýchlosť zvuku. Rovnica pre hmotnostný tok je [18]:

$$\dot{m} = A_E \rho_1 \sqrt{\kappa R T_1}, \quad (5)$$

kde  $A_E$  je účinný prierez,  $\rho_1$  je hustota,  $R$  je plynová konštanta a  $T$  teplota.



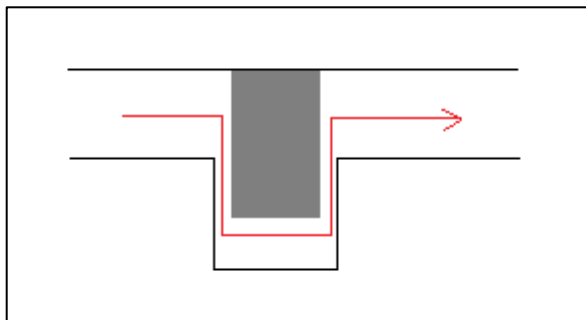
Obrázok 1.15 Mechanizmus prefuku vzduchu cez zámky krúžkov.



Hmotnostný tok plynu axiálnymi vôľami krúžku v hriadeľi sa dá popísať rovnicou pre medzeru [18]:

$$\dot{m} = \int_{\varphi} \rho \left( -\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} + U \frac{h}{2} \right) d\varphi, \quad (6)$$

kde  $h$  je axiálna vôľa medzi krúžkom a drážkou hriadeľa,  $U$  radiálna rýchlosť krúžku voči hriadeľu.



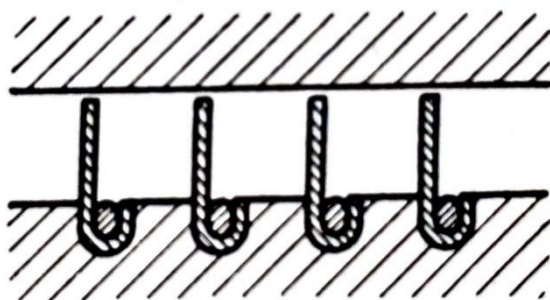
Obrázok 1.16 Mechanizmus prefuku medzerou medzi krúžkom a drážkou hriadeľa

## LABYRINTOVÉ TESNENIE

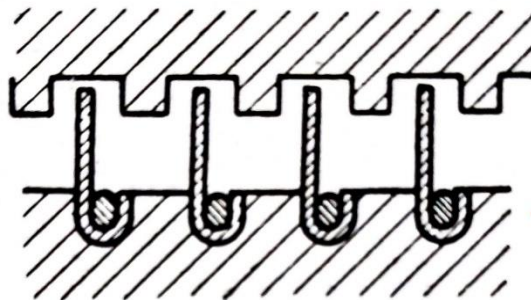
Labyrintové tesnenie je ďalším známym a používaným tesnením rotora turbodúchadla. Používa sa najmä u veľkých axiálnych turbodúchadlách, ktoré sú súčasťou objemnejších pohonných jednotiek, napríklad s výkonmi pohybujúcich sa medzi 2100 – 30 000 kW [20] na jedno turbodúchadlo, u malých radiálnych turbodúchadiel len zriedka. Takto veľké pohonné jednotky sú využívané najmä v lodnej nákladnej doprave. Do axiálnej turbíny je možné privádzať efektívnejšie väčší tok spalín ako do radiálnych, ktoré sú limitované zakrivením vedenia spalín.

Labyrintové tesnenie je zložené z britov, ktoré rozdeľujú medzeru medzi rotorom a statorom (ložisková skriňa). Brity sú uložené v niekoľkých radoch s J-profilom a väčšinou zalisované v rotore. V medzere pod britom nastáva adiabatický výtok vzduchu, spojený s poklesom tlaku, teploty a so vzrastom rýchlosti. V komôrke medzi dvoma britmi sa takmer úplne zmarí získaná rýchlosť za súčasného zvýšenia teploty na pôvodnú hodnotu. Tento dej sa opakuje v nasledujúcom rade labyrintu pričom platí, že tlak média vychádzajúceho z labyrintu je menší a jeho merný objem vyšší. Pre správnu funkciu labyrintového tesnenia je podstatné, aby pomer rozmerov komôrky a medzery pod britmi nebol príliš malý a predná hrana britu bola ostrá. Existujú rôzne typy labyrintového tesnenia, ktoré sa využívajú vo veľkej miere v parných turbínach, tieto labyrinty sa nazývajú pravé (brity zalisované v statore sú oddelené vysústruženými výstupkami z rotora).

V turbodúchadlách z dôvodu axiálnej montáže sú využívané nepravé labyrinty, tiež tzv. hladké labyrintové upchávky (viď obr. 1.17). V porovnaní s pravými (viď obr. 1.18) je množstvo toku unikajúceho vzduchu cez upchávky o 80% vyššie [21].

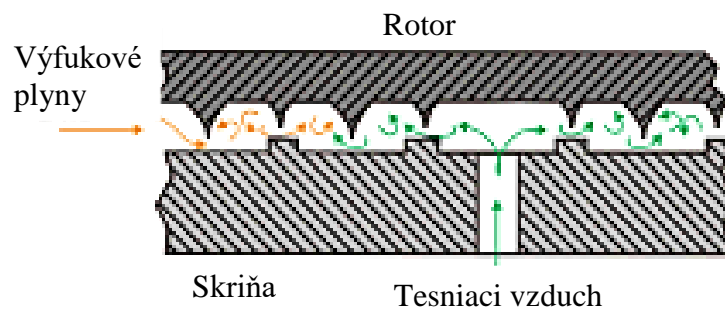


Obrázok 1.17 Detail nepravého labyrintu [21]



Obrázok 1.18 Detail pravého labyrintu [21]

Moderným mechanizmom labyrintového tesnenia, v ktorom sa používa tesniaci vzduch je znázornený na obr. 1.19. Tesniaci vzduch je dopravovaný z kompresorovej skrine vzduchovými kanálkami cez ložiskovú skriňu priamo do labyrintového tesnenia, kde podporuje jeho funkciu. Tesniaci vzduch má požadovaný tlak, ktorý bol dosiahnutý vopred stlačeným vzduchom v kompresorovej komore turbodúchadla a tiež vhodných prierezom vzduchového kanálika v ložiskovej skrini. Zabráni sa tak kontaktu oleja so spalínami, ktorý by bol výrazný pri vynechaní dodatočného tesnenia vzduchom. A práve to vedie k jednej z najväčších nevýhod labyrintového tesnenia, čím je značný prienik média cez tesnenie. Ďalšou výraznou nevýhodou je potenciálne riziko ulomenia britu tesnenia, ktoré by viedlo k deštruktívnemu poškodeniu turbodúchadla pri vniknutí britu do ložiska. V porovnaní s piestnymi krúžkami je výroba náročnejšia, čo je spojené s vyššími výrobnými nákladmi. Naopak tento druh tesnenia oplýva aj značnými výhodami ako je prevádzková spoľahlivosť (labyrintové tesnenie sa nezanáša nečistotami), dlhá životnosť a odolnosť tesnenia v agresívnom prostredí.



Obrázok 1.19 Použitie tesniaceho vzduchu v labyrintovom tesnení [22]

### 1.3.4 OLEJ

Olej, ako mazivo a chladiace médium rotora turbodúchadla je súčasťou olejovej sústavy motora. Na motorový olej sú kladené vysoké nároky a často sú aj protichodné. Výrobcovia motorov kladú požiadavky na oleje z rôznych oblastí a tu sú najdôležitejšie z nich:

**Oblasť trenia a opotrebenia:**

- Minimalizácia trenia a opotrebenia
- Zníženie spotreby paliva
- Odolnosť olejového filmu proti pretrhnutiu
- Žiadne povrchové poškodenie (pitting)

**Oblasť teploty a viskozity:**

- Tepelná stabilita
- Odolnosť voči oxidácii
- Stanovený pokles viskozity za vysokej teploty
- Viskozita, čerpaťnosť, dostatočná tekutosť za nízkych teplôt
- Čo najmenšia závislosť viskozity na teplote

**Oblasť čistoty–žiadne zostatky:**

- Disperzné schopnosti (rozptyľovacie)
- Detergentné účinky (čistiace)
- Žiadne uvoľňovanie a zapekávanie piestnych krúžkov
- Zabránenie vzniku studených a horúcich kalov
- Odolnosť voči vode
- Žiadne samozápaly

**Oblasť ďalších dôležitých fyzikálnych a chemických vlastností:**

- Ochrana pred koróziou
- Neutralizačné vlastnosti
- Tepelná a oxidačná stabilita
- Potlačenie penivosti
- Tesniaca schopnosť
- Dobrá tepelná vodivosť

**Oblasť aplikácie:**

- Zábehová vlastnosť
- Dlhé výmenné intervaly
- Trvalo rovnaká kvalita
- Žiadne negatívne vplyvy na zdravie a životné prostredie

[23]

Priemyselné mazivá obsahujú 75-90 % základného oleja a zvyšok tvoria aditíva, ktoré dopomáhajú dosiahnuť už vyššie spomínané požadované vlastnosti. Prídavné látky tvoria veľkú množinu aditív, z ktorej sú hlavné:

- **Aditíva pre hraničné a extrémne tlaky** – pri vzniku medzného mazania (napr. rozbeh alebo malé otáčky motora/turbodúchadla) dochádza k adhézii maziva k trecím povrchom. Vtedy je výhodné mať ochranný lubrikujúci povlak, ktorý ochráni kontaktné plochy od trenia a opotrebenia.
- **Biocídy** – oleje a emulgátory sú predmetom biologických útokov v roztoku. Z tohto dôvodu sú do oleja pridávané biocídy regulujúce aktivitu mikroorganizmov, a tým predlžujú životnosť maziva.
- **Alkalické prísady** – prísady zvyšujúce zásaditosť oleja z dôvodu predchádzania korózie z látok kyslého charakteru ( $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$ ), ktoré sú produktom spaľovania paliva s vysokým obsahom síry využívaného napr. v námorníctve.
- **Detergenty** – látky udržiavajúce suspenziu častíc s cieľom zvýšiť životnosť maziva. Využívajú sa najmä v naftových motoroch, kde sa môžu uhlíkové častice rozptýliť v mazive a povlaku čo by viedlo k tvorbe usadenín na častiach stroja.
- **Proti penivé prísady** – zabezpečujú dostatočné zaplavenie funkčných plôch mazivom a zlepšujú celkové pumpovanie oleja
- **Deemulgátory** – využívané tiež v námorníctve, kde mazivo ľahko príde do kontaktu s vodou a kontaminuje ho. Po kontaminácii aditívum vodu rýchlo odseparuje z maziva.
- **Antioxidanty** – znižujú rýchlosť oxidácie maziva, ktorá je výrazná hlavne pri zvýšenej teplote.
- **Aditíva upravujúce viskozitu**

[6]

## 1.4 PORUCHY

Pri výrobe, konštrukcii a úprave turbodúchadla je nutné použiť modernú metalurgiu vďaka ktorej sa splňajú kvality výrobcu. Niektoré z noriem kvality, ktoré musia byť splnené, súvisia s dimenzovaním častí turbodúchadla, ale tiež aj s ich chovaním počas prevádzky. Kontroluje sa rozmerová tolerancia dielov samotných a tiež zostavy, napr. vyvažovanie rotorovej časti. Ak sú v zostave hriadeľ a nejaké nedostatky vyváženia, dôjde počas prevádzky turbodúchadla pri vysokých otáčkach k vibráciám, ktoré majú za následok zvýšenie hlučnosti turbodúchadla a v závažných prípadoch spôsobia zlyhanie ložiska. Okrem toho, že tieto nedostatky môžu spôsobiť zlyhanie, tak majú tiež škodlivý účinok na účinnosť turbodúchadla. [8]

### 1.4.1 PORUCHY V DÔSLEDKU ZLÉHO MAZANIA

Uvádza sa, že až 50 % [8] všetkých porúch sú v dôsledku poruchy mazacieho systému. Určité množstvo oleja prechádzajúce turbodúchadlom v správnom čase a pri určitom tlaku špecifikuje jeho správnu prevádzku, ako aj jeho dlhú životnosť. Olej je zodpovedný za:

- Mazanie ložísk
- Zabezpečenie stabilizácie rotora a aj rotujúcich klzných ložísk (správa sa ako tlmič)
- Pôsobí ako chladiace médium, bráni nadmernému zvyšovaniu teploty

Pri zmene prevádzkových podmienok, ako je nárast otáčok v dôsledku zvýšenia zaťaženia motora sa zvýšia aj nároky na mazanie a chladenie. V prípade, že by nastalo prerušenie toku oleja, viedlo by to ku katastrofálnym následkom pre turbodúchadlo. Oneskorené alebo znížené množstvo toku oleja je možné rozpoznať zafarbením hriadeľa alebo ložiska v mieste ich styku. Ako je vidno na obr. 1.20, vplyvom tepla generujúceho sa pri vysokej rýchlosti sa zmení ich farba na odtiene modrej. [8]



Obrázok 1.20 Zmena povrchu hriadeľa turbodúchadla po nedostatočnom mazaní [8]

Oneskorené alebo znížené množstvo prietoku oleja je spôsobované hlavne zlou prevádzkou a údržbou. K zníženému tlaku oleja tiež vedie nesprávne fungujúce olejové čerpadlo. Pri štarte motora vplyvom výfukových plynov sa automaticky zaháji prevádzka turbodúchadla. Vyššie zaťaženie motora po štarte vedie k razantnému zvýšeniu otáčok rotora. V tomto momente ešte neexistuje účinné množstvo vo vnútornej a vonkajšej vôli ložísk. V dôsledku toho dochádza k neúčinnému mazaniu pohyblivých častí, ako aj destabilizácii hriadeľa. To vedie k opotrebovaniu ložísk. Ďalším faktorom ovplyvňujúci tok oleja je prípadná plastická deformácia olejového potrubia, ktorá spôsobí zmenšenie priemeru hriadeľa, a tým toku oleja. V prípade nedodržania odporúčaných intervalov výmeny oleja udaných výrobcami nastáva zhoršenie štruktúry oleja. Ďalej sa na vnútorných plochách rúrok, ako aj na obvode otvorov v klzných ložiskách tvorí kal (tento jav je výraznejší na strane turbíny kvôli horúcemu výfukovému prostrediu), ktorý vedie k zmenšeniu priemeru potrubia. To je ekvivalentné so znížením prietoku oleja v turbodúchadle. [8]

### 1.4.2 PORUCHA V DÔSLEDKU KONTAMINÁCIE OLEJA

Najčastejšou poruchou turbodúchadiel je porucha spojená s kontamináciou oleja. Kontamináciu oleja môže spôsobiť prostredie, v ktorom je veľa nečistôt alebo nedodržiavanie intervalov výmeny oleja. Olej sa prirodzene kontaminuje aj kovovými čiastočkami oddeľujúcimi sa z ostatných komponentov motora, ktoré začínajú zlyhávať. Obr. 1.21 a 1.22 ilustrujú porušené radiálne klzné puzdrá a hriadeľ rotora v dôsledku kontaminácie oleja. Typické znaky kontaminovaného oleja sú:

- poškodenie povrchu radiálneho klzného puzdra na vnútornom a vonkajšom priemere,
- poškodenie povrchu axiálneho ložiska,
- ryhy na hriadeľi rotora,
- trenie turbínového a kompresorového kolesa o skriňu,
- zlomenie hriadeľa.

[2]



*Obrázok 1.421 Typický znak kontaminácie oleja na povrchu porušeného radiálneho klzného puzdra [2]*



*Obrázok 1.422 Typický príklad abrazívneho poškodenia hriadeľa kontaminovaným olejom [2]*

## 2 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

### 2.1 ANALÝZA PROBLÉMU

Firmy zaoberajúce sa výrobou a vývojom turbodúchadiel sa snažia zefektívniť svoje výrobky, aby práve tie ich boli najatraktívnejšie pre stálych ale aj budúcich zákazníkov. Jedným z problémov, ktorým sa zaoberajú je zefektívnenie tesnenia rotora turbodúchadla. Pri tesneniach rotora sú veľmi obmedzené možnosti. Zákazníci chcú finálny výrobok za čo najlepšiu cenu a zároveň s kompaktnými rozmermi. Ďalším obmedzením je samotný charakter spôsobu tesnenia, ktorý je bezkontaktný. Aby mohli firmy vyvíjať svoje technológie v oblasti tesnenia, potrebujú na to určité prostriedky, na ktoré sa môžu spoľahnúť.

Prvým prostriedkom, ktorý určí orientačnú efektivitu tesnenia rotora je simulácia modelu toku média vytvoreného v počítačovom softvéri. Druhým prostriedkom, ktorým sa dá overiť teória je prax. Vytvorením fyzického modelu, ktorý bude simulovať prietok média cez tesnenie rotora dokážeme overiť matematické modely, prípadne ich vylepšiť alebo vyvrátiť.

Ako bolo spomenuté v kap. 1.3.3, hmotnostný tok plynu cez piestne krúžky je úmerný tretej mocnine axiálnej vôle piestneho krúžku v drážke na hriadeli pokiaľ ide o tenkú vrstvu.

$$\dot{m} \sim h^3 \quad (7)$$

Počas experimentu bude práve táto axiálna vôľa  $h$  premennou veličinou, ktorej zmena ovplyvní hmotnostný tok média. Problematikou návrhu skúšobného stavu bude nastavenie axiálnej vôle, ktorej hodnoty v turbodúchadle série GT35 dosahujú približne 40  $\mu\text{m}$ .

### 2.2 CIEĽ PRÁCE

Cieľom práce je vytvoriť návrh jednoduchého technického experimentu, ktorým sa priamo zistí množstvo toku média cez tesnenie rotora turbodúchadla. Technický experiment je navrhnutý pre turbodúchadlá rozmerovo podobné GT35. Táto generácia turbodúchadla je extrémne účinná, disponuje vysokým výkonom a veľmi rýchlym nárastom otáčok vďaka guľôčkovým ložiskám. Rotor tejto generácie je uložený na dvojítych guľôčkových ložiskách z nerezovej ocele a vytesnený piestnymi tesniacimi krúžkami. Celá sústava turbodúchadla disponuje výkonom približne 447 kW [24] a je chladená vodou.

Technický experiment má byť kompatibilný s vybavením laboratórií Ústavu automobilného a dopravného inžinýrství. Ako bolo spomenuté generácia GT35 je tesnená piestnymi krúžkami, a preto geometria modelu experimentu musí korešpondovať s geometriou piestnych krúžkov a ich uložením na hriadeli rotora.

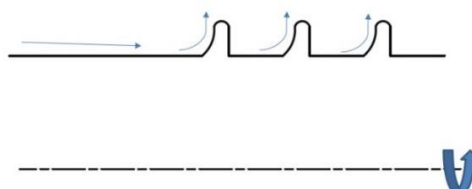
Okrem motorového oleja, ktorý za určitých podmienok môže prenikať cez tesniace piestne krúžky do kompresorovej alebo turbínovej komory, existuje ešte jedno médium, a tým je vzduch, ktorý tvorí prefuky, tzv. blow-by. Oba tieto stavy sú nežiadúce a vyskytujú sa alebo sú výraznejšie v určitých ustálených režimoch prevádzky turbodúchadla. Práve kvôli nerovnomernosti prevádzky turbodúchadla sa experiment rozčlení na viacero režimov, v ktorých sa bude meniť utesňujúce médium (motorový olej, vzduch) a tlak, pod ktorým im budú tesniace krúžky brániť v toku.

Hlavným cieľom práce je rozpracovať koncepciu technického experimentu do výkresovej dokumentácie, vďaka ktorej sa následne vypracuje cenová ponuka celej výroby skúšobného stavu. Po konštrukcii je ešte nutné spracovať návod na obsluhu a priebeh experimentu.

### 3 KONCEPČNÉ RIEŠENIE

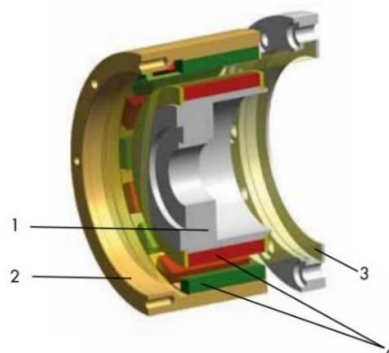
#### 3.1 KONCEPT ROTUJÚCEHO HRIADEĽA

Chod turbodúchadla je charakteristický vysokými otáčkami hriadeľa rotora, preto je v prvotnej snahe zakomponovať rotáciu do skúšobného stavu. S rotáciou je hneď spojený problém s voľbou takého tesnenia, aby sa dal experiment považovať za presný a dôveryhodný. V prípade merania objemového toku oleja, ktorý pretečie cez piestne krúžky sa dá docieľiť odlúčenie oleja od častí hriadeľa nachádzajúceho sa za krúžkami prirodzeným, jednoduchým spôsobom, ktorého detail je na obr. 3.1. Časť oleja, ktorý prenikne cez piestne krúžky bude mať tendenciu zotrvať na povrchu hriadeľa. Vplyvom tlaku bude zotrvať v pohybe smerom k druhému koncu hriadeľa, kde je umiestnené tesnenie rotujúceho hriadeľa. V prípade, že by sa olej dostal k tesneniu je možné, že by cezeň prenikol a nastali by straty pri meraní. Tento problém je vyriešený vysústružením výbežkov na hriadeľi, na ktoré olej nabehne a vplyvom odstredivej sily je odlúčený od povrchu hriadeľa na povrch skrine, z ktorej stečie priamo do výstupu, pod ktorým prebieha meranie.



Obrázok 3.1 Odlúčenie oleja od zvyšku hriadeľa za krúžkami vplyvom odstredivých síl

V nasledujúcom meraní sa vymení olej za vzduch, a tým pádom vysústružené výbežky na hriadeľi by nemali žiadnu účinnosť. Po pretlačení vzduchu cez piestne krúžky sa v komore skrine za krúžkami vytvorí určitý tlak, a práve pod týmto tlakom by mohli nastať straty média prienikom cez dynamické tesnenie. Takmer dokonalá tesnosť sa dá dosiahnuť len za použitia statického tesnenia. Za predpokladu, že je potrebné zachovať otáčky a použiť statické tesnenie, pripadá v úvahu využitie magnetickej spojky, ktorá je znázornená na obr. 3.2. Na pozícii 1 a 2 je vnútorný a vonkajší rotor, pozíciou 4 sú označené permanentné magnety a 3 je statické tesnenie oboch rotorov z nekovového materiálu, ktoré zaručuje vynikajúcu tesnosť média vo vnútri skrine.



Obrázok 3.2 Magnetická spojka firmy KVU s.r.o. [25]

Otázkou je, do akej presnosti sa dá nastaviť axiálna voľba  $h$  v drážkach pre krúžky a či by to bolo vôbec možné a zároveň merateľne spoľahlivé na úrovni technického experimentu.

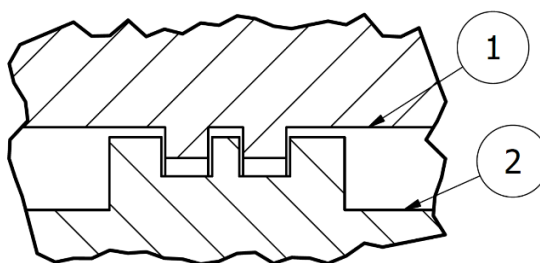


### 3.2 KONCEPT NEROTUJÚCEHO HRIADEĽA

V prípade zanedbania rotácie sa naskytujú možnosti vytvoriť jednoduchý, funkčný návrh experimentu, ktorý by za použitia statického tesnenia hriadeľa spĺňal požiadavku na vytvorenie spoľahlivého experimentu.

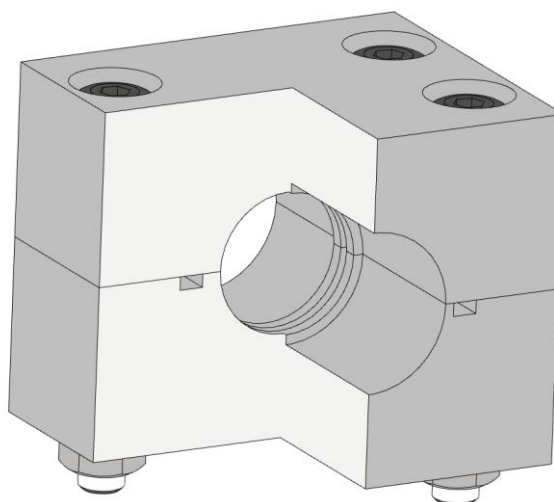
#### 3.2.1 ROZOBERATEĽNÁ SKRIŇA

Jednou z možností simulácie uloženia krúžkov na hriadeľi, ako je vidno na obr. 3.3, je zakomponovať ich priamo do skrine. To znamená, že pri sústružení diery v skrini sa vysústružia aj výbežky s rovnakou geometriou ako piestne krúžky. Toto uloženie je ekvivalentné k samotnému uloženiu piestných krúžkov, pretože počas prevádzky turbodúchadla sa piestne krúžky vzhľadom k skrini nepohybujú (výnimkou môže byť zábeh turbodúchadla po montáži a extrémne zmeny tlakov v turbodúchadle).



Obrázok 3.3 Detail geometrie výstupkov v diere skrine (pozícia 1) a drážok na hriadeľi (pozícia 2)

V prípade výberu riešenia ekvivalencie výstupkov s piestnými krúžkami by bola nutná radiálna montáž. Z tohto dôvodu by sa zvolila rozoberateľná skriňa, vid' obr. 3.4. Konštrukcia a technológia výroby skrine je inšpirovaná výrobou ojnice kľukového hriadeľa, ktorá obsahuje dieru a zároveň sa skladá radiálne. Výroba by prebiehala nasledovne: po ofrézovaní vonkajších rozmerov hranola sa vyvrtávajú štyri presné diery pre lícované skrutky, potom by sa hranol rozrezal pozdĺžne na dve časti a zmontoval skrutkami, nasledovne po montáži by prišlo na rad sústruženie diery s výstupkami čím vznikne rozoberateľná skriňa, ktorá by bola presne montovateľná vďaka lícovaným skrutkám.

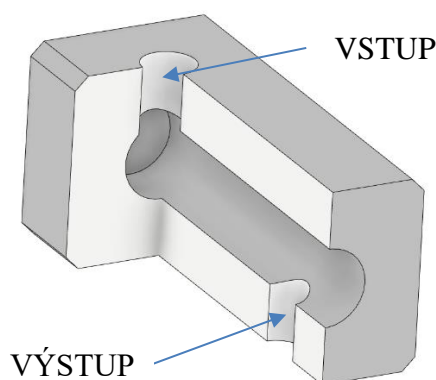


Obrázok 3.4 Rozrezaná skriňa uložená v lícovaných skrutkách

### 3.2.2 MASÍVNA SKRIŇA S POUŽITÍM PIESTNYCH KRÚŽKOV

Počas toku média cez piestne krúžky určité množstvo prechádza cez zámok piestneho krúžku. V koncepte rozoberateľnej skrine by sa veľmi ťažko vyrobil otvor simulujúci zámok krúžku, a práve preto treba uvažovať o inom koncepte, v ktorom by sa dali priamo využiť originálne piestne krúžky pre sériu GT 35. Za použitia krúžkov je evidentné, že montáž bude musieť prebiehať v axiálnom smere. Tým pádom sa naskytne možnosť použiť jednoduchú skriňu, v ktorej bude vyvrtaná diera s presnou geometriou ako v uložení piestnych krúžkov turbodúchadla GT35.

Za predpokladu axiálnej montáže zostavy stačí uvažovať len s jedným montážnym otvorom v skrini, a tým pádom aj jednej tesniacej príruby. Tento koncept má predpoklad oplývať niekoľkými výhodami, napr. menším počtom tesniacich plôch, jednoduchou, rýchlou montážou a jednoduchou výrobou, s čím súvisia aj výrobné náklady.



Obrázok 3.5 Koncept masívnej skrine s otvormi pre vstup a výstup média

### 3.2.3 KONCEPT POSUVU

V neposlednom rade je nutnosťou vymyslieť mechanizmus na určenie a vymedzenie axiálnej vôle piestnych krúžkov. Aj v tomto prípade existuje rada riešení. Prvým jednoduchým riešením je použitie mierok s brúseným povrchom. Mierky (škáromer) sa dajú bežne kúpiť v rozsahu hrúbky 0,02 až 1 mm. Výhodou použitia mierky je veľmi nízka obstarávacía cena. Avšak po dôkladnom premyslení priebehu nastavovania axiálnej vôle by hrozil vznik veľkej odchýlky vôle pri zasúvaní mierky medzi dva povrchy.

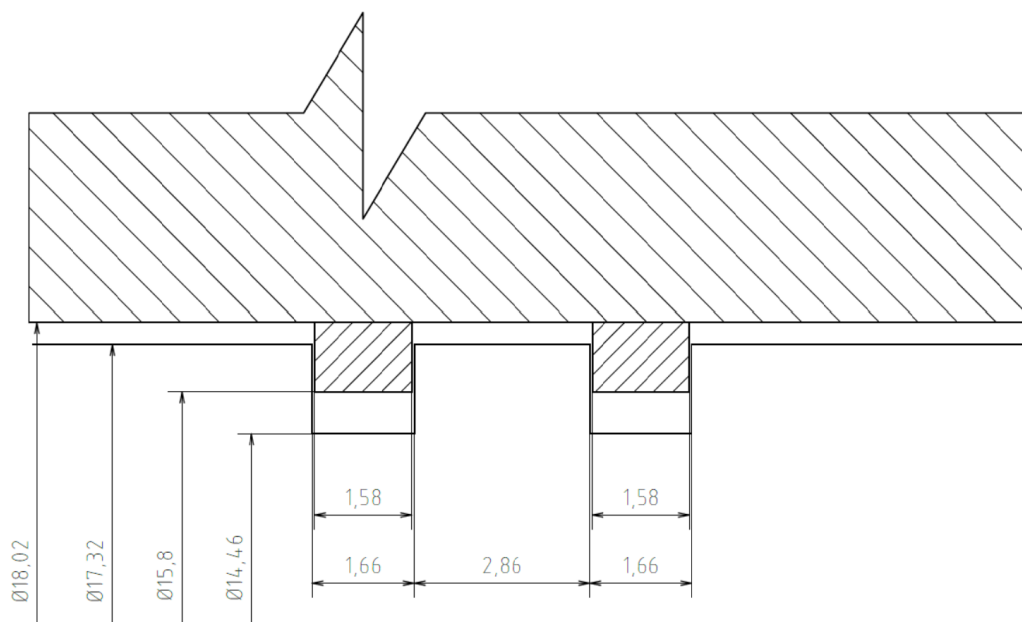


Obrázok 3.6 Mierky na meranie medzery [26]

Ďalšou možnosťou vymedzenia axiálnej vôle je použitie závitů s malým stúpaním. Takéto závitů sa tiež využívajú v mikrometrických meradlách. Mikrometre dosahujú presnosť 0,01 mm, ktorá by bola pre našu aplikáciu dostačujúca.

## 4 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE

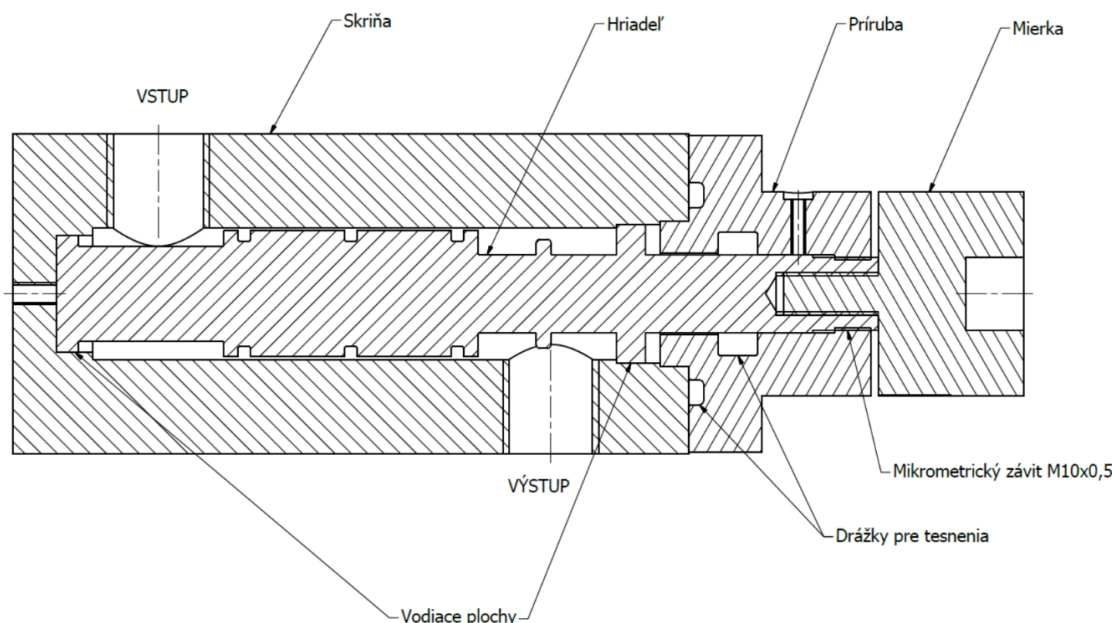
Po dôkladnom zvážení možností koncepčných riešení konštrukcie skúšobného stavu a požiadavke na jednoduchý konštrukčný návrh sa dá s istotou uzavrieť výber masívnej skrine s nerotujúcim hriadeľom. V priebehu experimentu bude hlavnou premennou už spomínaná axiálna vôľka krúžkov v drážkach hriadeľa zo strany vstupu média. Tým pádom zanedbáme rotáciu hriadeľa, ktorá nemá výrazný vplyv ani na tok vzduchu, ani oleja. Výsledná konštrukcia bude jednoduchá, s kompaktnými rozmermi a za čo najlepšiu cenu. Experiment bude kompatibilný s geometriou tesnenia turbodúchadla GT35 a výrobné tolerancie sú zvolené na základe zaužívaných tolerancií pri výrobe turbodúchadiel s podobnou veľkosťou. Geometria tesniacej časti GT35 je zobrazená na obr. 4.1. Turbodúchadlo je určené pre výkonnejšie motory, ktoré v turbodúchadle vyvinú vyššie hodnoty tlakov, a tým sa zväčšia tlaky v turbínovej a následne kompresorovej časti turbodúchadla. Preto sa využívajú dve osadenia piestnych krúžkov a každý jeden z nich redukuje určitý tlakový spád.



Obrázok 4.1 Zjednodušená geometria tesnenia rotora GT35

## 4.1 REALIZÁCIA SKÚŠOBNÉHO MECHANIZMU

Na obr. 4.2 je znázornená v reze zostava skúšobného mechanizmu, ktorá je tvorená štyrmi hlavnými súčiastkami: skriňa, hriadeľ, príruha a mierka. Tieto súčiastky sú bližšie popísané v nasledujúcich podkapitolách a pri každej je uvedená aj cenová ponuka výroby, získaná od firmy JaNo s.r.o.



Obrázok 4.2 Rez zostavy skúšobného mechanizmu

### 4.1.1 SKRIŇA

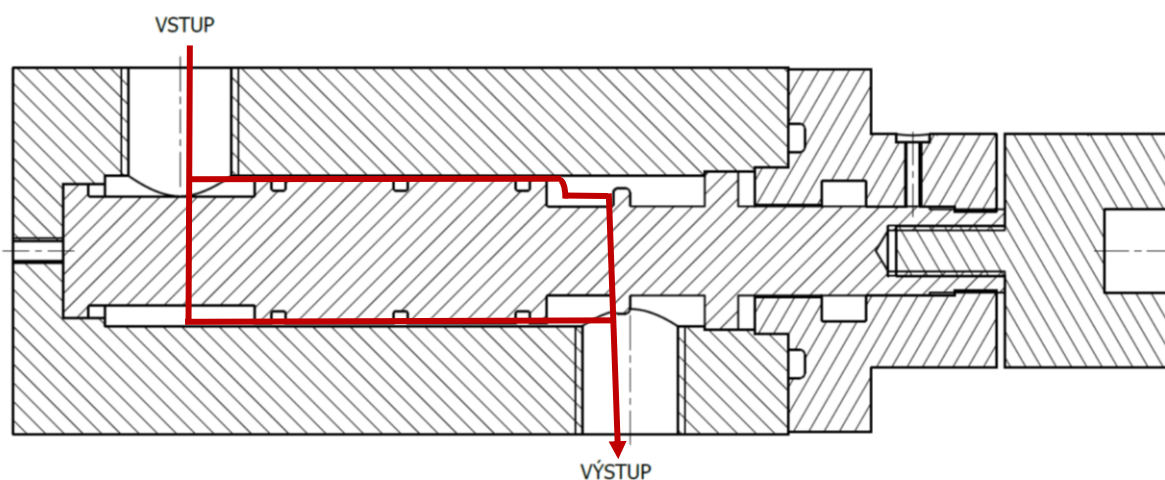
Technologicky najzložitejšou súčiastkou celej zostavy je práve skriňa. Obsahuje hlavný otvor s rozmerovou toleranciou  $\pm 0,025$ ; dve diery H7, ktorých plochy majú vodiacu funkciu hriadeľa; dva väčšie otvory so závitmi M14 a G1/4 slúžiacimi, ako vstup a výstup média; na zadnej strane skrine sa nachádza montážny odvzdušňovací otvor; na bočných stranách sú umiestnené otvory so závitom M8 určené pre montáž snímačov tlaku, ktorými je možné zaznamenať tlakový spád v priestore medzi tesniacimi krúžkami, otvory sú navrhnuté tak, aby snímač po montáži nezasahoval do vnútorného priestoru hlavného otvoru skrine. Zvyšné otvory so závitmi majú spájaciu funkciu.

Materiál polotovaru je štvorcová tyč S 355J2 so dĺžkou strany 50 mm. Ocel S355J2 je využívaná k výrobe tlakových nádob, je dobre obrábateľná a má zaručenú zvráťnosť. Možnosť zvarovania je pri skrini veľkou výhodou, pretože sa dá využiť k možnému vylepšeniu alebo prirobeniu nejakého držiaku.

Hodnota výroby bola nacenená na 11 050 Kč (viď príloha č. 1). Vyššia cena je z dôvodu presnej výroby malých rozmerov a tiež nutnosti využitia technológie brúsenia k dosiahnutiu strednej aritmetickej odchýlky profilu drsnosti na povrchoch v dierach s hodnotami Ra 0,4 (hlavná diera) a Ra 0,8 (vodiace plochy a vystredňujúci otvor pre prírubu).

#### 4.1.2 HRIADEĽ

Na relatívne krátkej dĺžke hriadeľa je skonštruovaný veľký počet prvkov zastávajúcich rôzne funkcie. Uloženie H7/h6 s vôľou hriadeľa v skrini zabezpečuje hladký posuv a vystredenie hriadeľa v hlavnej diere skrine. Hriadeľ obsahuje tri drážky pre piestne tesniace krúžky avšak v turbodúchadle GT35 sú obsiahnuté len dve. Tretia je pridaná z dôvodu otestovania rozdielu tesniacej schopnosti pri zvýšení počtu piestnych krúžkov. Po prechode maziva je na hriadeľi skonštruovaný zaoblený výbežok, ktorým sa zredukuje prechod oleja k X-krúžku, cez ktorý by potenciálne mohol nastať únik oleja. Pri príchode oleja k výstupku začne olej výraznejšie stekať smerom dolu a následne k výstupu. Prechod oleja cez hriadeľ je znázornený na obr. 4.3. Na konci hriadeľa je navrhnutý vonkajší mikrometrický závit M10x0,5, ktorým sa zabezpečí axiálny posuv hriadeľa a vnútorný závit M6, do ktorého sa zaskrutkuje mierka. Pootčením mierky sa nastaví posuv hriadeľa, a tým pádom axiálna vôľa  $h$  v krúžkoch (viď. kap. 5.2.1).



Obrázok 4.3 Znázornenie predpokladaného prechodu oleja cez hriadeľ

Za materiál hriadeľa bola zvolená oceľ 11 600, čo je štandardná oceľ využívaná na výrobu hriadeľov. Oceľ triedy 11 je ľahko obrábatelná a najmä táto vlastnosť sa využije pri výrobe členitého tvaru hriadeľa malých rozmerov.

Hodnota výroby bola nacenená na 6 900 Kč (viď príloha č. 1). Najmenej tolerovanými funkčnými rozmermi je uloženie hriadeľa v skrini a šírka drážok pre poistné krúžky.

#### 4.1.3 PRÍRUBA

Hlavnou funkciou príruby je zabezpečenie odtesnenia vnútorného priestoru skrine. Obsahuje drážky pre axiálne tesnenie: O-krúžok (rozhranie skrine a príruby) a radiálne tesnenie: X-krúžok (rozhranie hriadeľa a príruby). Prítlak na plochu skrine je vyvinutý štyrmi skrutkami M3. Ďalším dôležitým prvkom je vnútorný závit M10x0,5 na nastavovanie axiálnej vôle  $h$  (viď. kap. 5.2.1). Zvrchu valcovej plochy s menším priemerom je navrhnutá diera so závitom M2. Jej úlohou je zaistenie hriadeľa pomocou skrutky po nastavení axiálnej vôle. Na čelnej ploche je umiestnená značka v tvare čiary vzhľadom, ku ktorej sa bude mierka pootáčať.

Zvolený materiál je S235JR. V praxi sa často používa na výrobu prírub. Kvôli zachovaniu funkčnosti tesnenia sa nachádza na príрубе množstvo tolerovaných rozmerov, ktoré sa odzrkadlia v nákladoch na výrobu. Hodnota príruby je druhou najvyššou položkou v cenovej ponuke výroby a je to 7 100 Kč (viď príloha č. 1).

## 4.2 VOĽBA TESNENIA

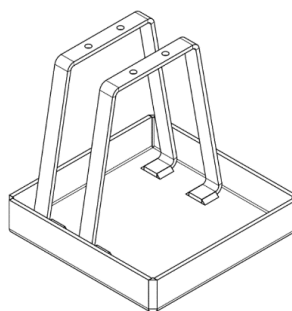
Dômyselnosť skúšobného mechanizmu spočíva v tom, že sa použijú priamo originálne piestne krúžky z GT35, a tak sa zostava bude skladať axiálne. V tom prípade skriňa obsahuje len jeden hlavný otvor, ktorý je potrebné utesniť prírubou. Príruba obsahuje už spomínané dve drážky pre tesnenie. Tesnenie bolo zvolené z katalógov od firmy Hennlich s.r.o. V prvom kroku je nutné zvoliť typ tesnenia. Na rozhranie axiálneho odtesnenia skrine a príruby je zvolený O–krúžok. Je to veľmi jednoduchý variant tesnenia a zároveň cenovo dostupný. S odtesnením tohto rozhrania by nemali nastať žiadne komplikácie, keďže s prírubou sa nebude vzhľadom k skrini počas experimentu vôbec manipulovať. Na rozhranie radiálneho odtesnenia hriadeľa a príruby je zvolený X–krúžok s podperným krúžkom na jednej strane. Na tomto rozhraní by mohol byť O–krúžok problematický. Počas nastavovania axiálnej vôle v drážke pre poistný krúžok sa hriadeľ otáča cez vnútorný závit príruby M10x0,5. V momente otáčania a zároveň axiálneho posuvu je riziko pretočenia O–krúžku, tento fakt by negatívne ovplyvnil funkčnosť tesnenia. Tento problém je vyriešený voľbou X–krúžku, ktorý má štvorcový prierez a zamedzuje akejkolvek rotácii. Ďalšou významnou výhodou X–krúžku je menšie potrebné počiatkové stlačenie. V priestore vytvorenom medzi britmy sa zachycuje mazivo, ktoré počas nastavovania axiálnej vôle  $h$  pomáha k hladkému a nepružnému posuvu. Aj rozhranie hriadeľ – príriba sa považuje za statické, pretože počas tlakovej záťaže bude vždy v kľude.

Po zvolení typu tesnenia sa volí prierez, ktorý by mal byť maximálny možný. Konštrukčné priestory zostavy dovolili zvoliť prierezy 2,65 mm (O – krúžok) a 3,53 mm (X – krúžok), šírka podperného krúžku je 1,4 mm. Materiál pre obe tesnenia je NBR 70, ktorý má optimálnu tvrdosť pre tesnenie a dostačujúci rozsah tesniaceho média od  $-30^{\circ}\text{C}$  po  $100^{\circ}\text{C}$  [27]. Je vhodný pre tesnenie minerálnych olejov.

Zvolený O–krúžok sa objednáva pod označením 25,8x2,65-NBR70 a X–krúžok 10,69x3,53-NBR70.

## 4.3 PODSTAVA

Cieľom pri konštrukcii podstavy je zaistiť ľahkú, stabilnú a funkčnú konštrukciu, na ktorú je možné jednoducho a rýchlo namontovať skúšobný mechanizmus. Celá zostava podstavy obsahuje dva podstavce, ktoré sa prizvárajú k vani až po priskrutkovaní k skúšobnému mechanizmu. Podstavce sú ohýbané a sú v nich vyvŕtané diery pre montáž skúšobného mechanizmu a podstavy. Navarením podstavcov na vaňu vznikne nerozoberateľná zostava podstavy. Polotovarom vane je plech o hrúbke 3 mm, ktorý sa ohne do požadovaného tvaru vane a následne sa medzery medzi hranami v rohoch zvarujú. Zvary plnia iba nepriepustnú funkciu v prípade úniku oleja mimo skúšobného mechanizmu a meracích prístrojov. Vaňa spolu s dvomi podstavcami je znázornená na obr. 4.4 a je nacenená na hodnotu výroby 6 050 Kč (viď príloha č. 1).



Obrázok 4.4 Podstava skúšobného mechanizmu

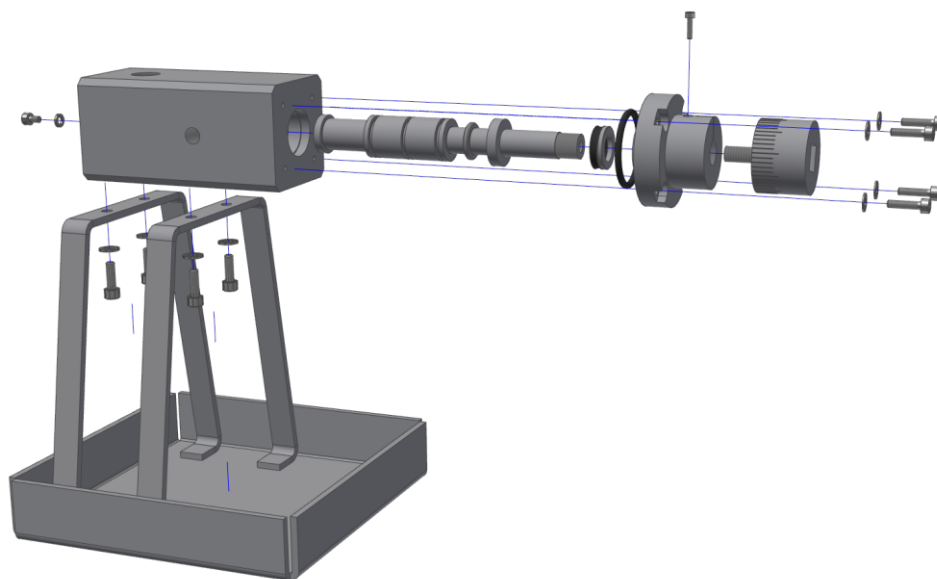


## 5 KONCEPCIA PRIEBEHU TECHNICKÉHO EXPERIMENTU

### 5.1 POSTUP MONTÁŽE

Skúšobný stav experimentu určenia toku cez piestne krúžky turbodúchadla bol navrhnutý tak, aby sa jednotlivé diely ľahko, rýchlo a jednoducho zmontovali. Postup montáže je dôkladne opísaný v niekoľkých nasledujúcich krokoch:

- 1.) Na pevnú podložku položíme podstavu, na ktorú upevníme skriňu pomocou 4 skrutiek so závitom M4.
- 2.) Uchopíme prírubu a do drážok určených na tesnenie opatrne vkladáme O–krúžok a X – krúžok tak, aby sme ich nepoškodili. Do drážky pre X–krúžok vložíme podperný krúžok tak, aby smerom od dutiny skrine postupne nasledoval X–krúžok a potom podperný krúžok.
- 3.) Na hriadeľ sa zavedú piestne tesniace krúžky.
- 4.) Prírubu, ktorej súčasťou je už aj tesnenie, opatrne nasúvame na hriadeľ tak, aby sa nepoškodil povrch X–krúžku. Po nasunutí príruby skrutkujeme na hriadeľ minimálne až kým nevyčnieva koniec hriadeľa.
- 5.) Uchopíme mierku a na jej vonkajší závit namotáme tesniacu pásku využívanú v závitoch v potrubí na tesnenie kvapaliny. Namotáním pásky dosiahneme zvýšenie trenia v závite a pri nastavovaní axiálnej polohy hriadeľa nebude mierka v závite preklzovať. Pevne uchopíme hriadeľ s naskrutkovanou prírubou a naskrutkujeme naň mierku až na doraz. Je dôležité, aby mierka nemala v hriadeľi žiaden stupeň voľnosti.
- 6.) Teraz zostavu hriadeľa s krúžkami, príruby s tesnením a mierky vložíme opatrne do dutiny skrine a prírubu zaskrutkujeme pomocou štyroch skrutiek so závitom M3. Vodiace plochy hriadeľa sa môžu jemne namazať olejom.
- 7.) V závere cez otvor vstupu skontrolujeme plynulé, hladké otáčanie hriadeľa a mikrometrický posuv.



Obrázok 5.1 Schéma montáže skúšobného zariadenia

## 5.2 PRIEBEH MERANIA

Skriňa skúšobného stavu experimentu je navrhnutá pre jednoduchú výmenu pretekajúceho média. Výmena média na vstupe zo vzduchu na olej sa realizuje odskrutkovaním hadicovej prípojky G1/4 s redukciou M14x1,5–G1/4 a následnou inštaláciou hydraulickej prípojky M14x1,5–M18x1,5. Vstupný tlak pri meraní prietoku oleja alebo vzduchu zabezpečuje hydraulická a pneumatická jednotka, ktoré sa nachádzajú v laboratórii Ústavu automobilného inžinierstva.



Obrázok 5.3 Hydraulická jednotka (vľavo) so zásobníkom oleja (vpravo)



Obrázok 5.2 Pneumatická jednotka

Po zabezpečení potrebného tlaku média či teploty oleja na vstupe dokážeme zmerať tlak za prvým alebo druhým tesniacim krúžkom vďaka dvom otvorom, ktorými je opatrená skriňa na bočných plochách. Do otvorov sa nainštalujú snímače tlaku, ktorých merací rozsah je 0 až 16 bar. S rozsahom tlaku snímačov si bohato vystačíme, keďže tlak na vstupe bude dosahovať max. 4 až 5 bar. Snímač tlaku je znázornený na obr. 5.4. Z obrázku je evidentné, že snímač sa do otvoru zaskrutkuje pomocou závit M8 a odtesní sa 1,5 mm hrubou tesniacou medenou podložkou.



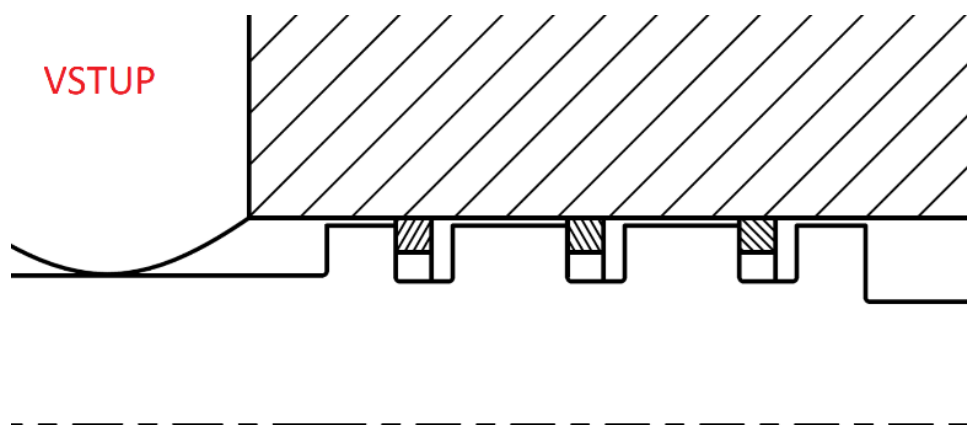
Obrázok 5.4 Snímač tlaku, pozícia: medzi piestnymi tesniacimi krúžkami



### 5.2.1 NASTAVENIE AXIÁLNEJ VÔLE

Premennou celého skúšobného stavu je axiálna medzera poistného krúžku  $h$  zo smeru vstupu média. Hodnoty tejto medzery sa v priebehu experimentu budú porovnávať s hodnotami toku média. Presnosť nastavovania je ovplyvnená vôľou mikrometrického závitu a mierkou ktorej obvod je rozdelený na 50 dielikov. V nasledujúcich krokoch je uvedený postup nastavenia axiálnej vôle  $h$  medzi krúžkom a drážkou v hriadeli.

- 1.) Východisková poloha hriadeľa po montáži skúšobného mechanizmu je nastavená približne v polovici rozsahu posuvu v mikrometrickom závite. Práve v tejto polohe je možný posuv 1 mm do oboch smerov.
- 2.) Po približnom nastavení počiatočnej polohy začneme točiť mierkou tak, aby sa tesniaca časť hriadeľa posúvala smerom k výstupu v skrini. Posúvame približne 0,5 mm, tzn. jedna otáčka na mierke. Dôležité je pri otáčaní mierky zastaviť tak, aby splývali niektorá z vygravírovaných čiar na mierke a čiara na prírubе. V tomto momente sú krúžky natlačené na ploche drážky bližšej k vstupu média, tento stav je znázornený na obr. 5.5.
- 3.) Pootočíme mierkou v opačnom smere (tzn. nastáva posuv hriadeľa smerom k vstupu) o požadovaný počet dielikov s tým faktom, že pootočenie o jeden dielik znamená axiálny posuv hriadeľa o 10  $\mu\text{m}$ . V tomto momente tesniaci krúžok zotrúva na mieste a posúva sa len hriadeľ, kvôli čomu sa vytvorí medzera  $h$ .
- 4.) Po nastavení požadovanej medzery  $h$  je potrebné zaistiť voľnosť rotácie hriadeľa zaskrutkovaním a dostatočným dotiahnutím skrutky so závitom M2 v prírubе. Po zaistení hriadeľa je ešte potrebné zaskrutkovať skrutku z opačnej strany skrine do odvzdušňovacieho otvoru so závitom M3 a skrutku podložiť tesniacou podložkou.
- 5.) Teraz je hriadeľ zaistený a je dovolené aktivovať vstup média do skrine.



Obrázok 5.5 Natlačené krúžky na stene drážky pri axiálnom posuve hriadeľa smerom od vstupu

### 5.2.2 MERANIE HODNOTY PREFUKU VZDUCHU (BLOW-BY )

Meranie množstva prefuku vzduchu bude realizované zisťovaním hmotnostného toku. Na trhu je množstvo produktov, ktorými sa meria hmotnostný tok vzduchu, ich hlavnými rozdielmi sú presnosť merania a merací rozsah hmotnostného toku, ktorý sú schopné zmerať. V prípade tohto experimentu sa odhaduje prietok vzduchu v desatinách až jednotkách litrov za minútu pri izbovej teplote 20 °C. Potenciálne by sa dal využiť hmotnostný prietokomer Red-y Industrial od firmy GASOTECH s.r.o., ktorého potenciálne využitie je obsiahnuté aj v laboratóriach. U predajcu je možné si zvoliť zo širokej škály merateľných rozsahov a takisto je možnosť voľby presnosti, ktorej najlepšia hodnota dosahuje  $\pm 0,3\%$  z meracieho rozsahu. Prístroj je zobrazený na obr. 5.6. Jeho vstup je závit G1/4 a dá sa jednoducho namontovať v ľubovoľnej polohe.



Obrázok 5.6 Hmotnostný prietokomer Red-y Industrial, GASOTECH s.r.o.

### 5.2.3 MERANIE HODNOTY SPOTREBY OLEJA

Meranie spotreby oleja bude prebiehať meraním objemového toku. Meranie objemového toku oleja je vzhľadom k predchádzajúcemu meraniu hmotnostného toku vzduchu veľmi jednoduchá záležitosť, pri ktorej sa dá zaobísť bez drahých prístrojov. Podstavec skúšobného stavu je konštruovaný tak, aby sa pod výstup skrine zmestila minimálne 250 ml kadička. Po ustálení toku oleja cez skúšobný stav sa s vložením kadičky spustí meranie času na stopkách. Pri nedôkladnej synchronizácii vloženia kadičky a spustenia časomierey môžu nastať pri malých objemoch určité nepresnosti. V tomto prípade sa do výstupu môže nainštalovať hadička, cez ktorú bude olej vytekať do objemnejšej nádoby, a tým sa výrazne ovplyvní presnosť merania. Po meraní sa pracuje s veličinami zmeraného objemu a času, z ktorých sa zhotoví objemový tok podľa vzorca:

$$Q_V = \frac{V}{t}, \quad (8)$$

kde  $Q_V$  je objemový tok,  $V$  zmeraný objem a  $t$  zmeraný čas.

Nasledovať bude viacero meraní, z ktorých sa vyhodnotí objemový tok alebo hmotnostný tok média vzhľadom k axiálnej vôli  $h$  medzi krúžkom a stenou drážky, ktorá sa nastavuje mikrometrickým závitom so stúpaním 0,5 mm.

## SÚHRN

Hlavným cieľom práce bolo vytvoriť návrh skúšobného mechanizmu pomocou ktorého sme schopní určiť spotrebu maziva v turbodúchadle. Úlohou bolo tento mechanizmus navrhnuť a vytvoriť kompletnú výkresovú dokumentáciu.

Prvú časť práce tvorí rešerš, ktorá je zameraná hlavne na olejovú sústavu turbodúchadla a všetky súčiastky, ktoré s ňou súvisia a prichádzajú do kontaktu s olejom. Všetky tieto informácie bolo nutné uviesť pre predstavu o toku oleja a nutnosti jeho využitia v konvenčných turbodúchadlách. V jednotlivých kapitolách sú rozpracované možné mechanizmy úniku a spotreby maziva v turbodúchadlách.

V druhej časti práce sú načrtnuté koncepty možných variantov mechanizmu, ktoré slúžili na vzájomné porovnanie výhod a nevýhod potenciálnych riešení konštrukcie. Navrhnuté boli dva koncepty s rotujúcim a nerotujúcim hriadeľom, koncepty skrine s radiálnou a axiálnou montážou a koncepty vymedzovania axiálnej vôle tesniacich krúžkov v drážke hriadeľa.

Tretia časť práce vychádzala z koncepčného riešenia, v ktorej sa zvolilo najoptimálnejšie riešenie. Konštrukčné riešenie mechanizmu je vytvorené v programe Autodesk Inventor, v ktorom sa postupovalo vytvorením prvotných modelov jednotlivých súčiastok a zostavy, optimalizovaním rozmerov a tvarov zostavy a následnou tvorbou výkresovej dokumentácie výkresov súčiastok a zostavy s kusovníkom. V tejto časti je pri každej súčiastke opísaná voľba materiálu a kalkulácia výroby od firmy JaNo s.r.o.

V nasledujúcich častiach je dôkladne popísaný návod montáže a obsluhy mechanizmu experimentu, vďaka ktorému by to s prehľadom zvládla aj nezainteresovaná osoba. Uvedené je aj vybavenie laboratória a tiež návrh použitia konkrétneho prístroja na meranie hmotnostného toku vzduchu potrebný na dokúpenie.

Mechanizmus bol upravovaný a navrhnutý s cieľom zmerať objemový tok maziva cez piestne krúžky pod určitými tlakmi a tiež hmotnostný tok vzduchu tvoriaci v turbodúchadlách nežiaduce prefuky z kompresorovej/turbínovej časti do ložiskovej komory. Okrem týchto hodnôt je v experimente možnosť zmerania gradientu tlaku prechádzajúceho média cez tesniace krúžky pomocou dvoch snímačov tlaku.

## ZÁVER

Tento experiment sa dá považovať za jednoduchý stav simulácie režimov prevádzky turbodúchadla. V prípade požiadavky na dosiahnutie presnejšieho stavu merania je potrebné zakomponovať do skúšky rotáciu hriadeľa a tiež následné kmity vznikajúce z nedokonalých vyvážení rotora. Týmto skutočnosťami by sa experiment značne skomplikoval. Bolo by totiž nutné zakomponovať na hriadeľ ďalšie bezkontaktné tesnenie a v prípade príchodu a následným prechodom oleja by nastávali určité straty a z toho vyplývajúce nepresnosti experimentu. V prípade merania spotreby oleja, príchod k dodatočnému bezkontaktnému tesneniu (cez ktorý sa nemeria prietok, ale iba má za úlohu tesnosť skúšobného stavu) by sa dal zabrániť návrhom dostatočného počtu výbežkov (viď Koncept skúšobného stavu s rotujúcim hriadeľom), ku ktorým by sa mazivo vplyvom povrchového napätia dostalo a odstredivá sila by zabezpečila vyvrhnutie maziva na povrch dutiny skrine a následne stekanie do výstupu a meracej nádoby.

Pri meraní blow-by cez piestne krúžky (hmotnostný tok vzduchu) by to už také jednoduché nebolo. Bezkontaktné tesnenie by bolo nedostačujúce na utesnenie skrine a hriadeľa. Táto netesnosť by sa dala vyriešiť bezkontaktnou spojkou rotora motora a rotujúceho hriadeľa skúšobného mechanizmu, na ktorom by bolo testované tesnenie. Táto spojka by fungovala na princípe magnetizmu (viď Koncept rotujúceho hriadeľa s magnetickou spojkou). Avšak týmto komponentom by sa experiment značne predražil.

Počas rotácie rotora vo vysokých otáčkach za prítomnosti vibrácií sa môže mierne zmeniť geometria piestnych krúžkov a ovplyvní sa tak tesnosť rotora. Pri uvážení, že experiment bude prebiehať počas krátkeho časového úseku, t.j. po ustálení toku média rádovo v jednotkách minút, sa dá predpokladať, že rotácia hriadeľa nemá výrazný vplyv na tok média cez piestne krúžky. A preto môžeme očakávať relevantné a presné výsledky aj pri nerotujúcom hriadeľi. Z dlhodobého hľadiska z praxe by to mohol byť problém, pretože časom sa zväčšujú axiálne a radiálne vôle v uložení rotora v ložiskách, a tým pádom pri väčšej zmene záťaže majú krúžky tendenciu sa mierne opotrebovať vplyvom otláčania a trenia, čo môže viesť k zvýšeniu toku média cez tesnenie.

Navrhnutý technický experiment má potenciál pre firmy vyvíjajúce tesnenia rotorov v určení spotreby maziva pri ustálených režimoch turbodúchadla a hmotnostného toku vzduchu prefukujúceho cez piestne krúžky. S nameranými hodnotami sa dá následne pracovať či už porovnávaním a upravovaním softvérových matematických modelov, alebo ladením výsledkov pomocou súčiniteľov zahrňujúce faktory, ktoré ovplyvňujú tok média cez tesnenie a neboli zahrnuté v skúšobnom stave. Týmto faktormi môžu byť napríklad otáčky hriadeľa vzhľadom k tesneniu, následný vznik vibrácií a kmitanie hriadeľa. Vzhľadom k tomu, že faktory výrazne neovplyvňujú tok cez tesnenie a uváženým zvolením rozmerových a geometrických tolerancií je možné vyhlásiť, že experiment je dostatočne presný na požiadavky zadania. Je tiež plne využiteľný a kompatibilný so zariadením laboratória na Fakulte strojného inžinierstva v Brne.

Náklady na výrobu celej zostavy sú relatívne vysoké najmä kvôli požadovanej vysokej presnosti v malých rozmeroch a tiež je potrebné zahrnúť faktor kusovej výroby na zákazku. Hodnota 37 700 Kč je predajná suma cenovej ponuky firmy JaNo s.r.o. (viď príloha č. 1) za jednotlivé súčiastky zostavy skúšobného mechanizmu.

Konštrukcia skúšobného mechanizmu ponúka do budúcnosti potenciál pre možné vylepšenia experimentu. Prioritou by mohla byť snaha vymyslieť univerzálnu konštrukciu pre testovanie tesnenia rotorov rôznych rozmerov.

## ZDROJE

- [1] NGUYEN-SHÄFER, Hung. *Rotordynamics of Automotive Turbochargers*. Second Edi. Ludwigsburg, Germany: Springer, 2015. ISBN 978-3-319-17643-7.
- [2] MILLER, Jay K. *Turbo: Real World High-Performance Turbocharger Systems*. North Branch, Minn.: CarTech Inc., 2008. ISBN 978-1-932-49429-7.
- [3] EKNATH, Kondhalkar Ganesh a Dnyanesh K GAWANDE. Turbocharger Oil Sealing Design and Capability. *Ijmer* [online]. 2015 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: [Www.Ijmer.Com](http://www.ijmer.com)
- [4] HIERETH HERMAN a PRENNINGER PETER. *Charging the Internal Combustion Engine*. Wien: Springer, 2007. ISBN 978-3-211-33033-3.
- [5] CXRACING. *GT35-R Ball Bearing Turbo Charger* [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: [https://www.cxracing.com/TRB-GT35-R\\_OF-TRB-FEED-GT35](https://www.cxracing.com/TRB-GT35-R_OF-TRB-FEED-GT35)
- [6] HAMROCK, Bernard J., Steven R. SCHMID a Bo O. JACOBSON. *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*. Second edi. New York: Marcel Dekker, 2004. ISBN 0-8247-5371-2.
- [7] HONEYWELL INTERNATIONAL INC. *Turbocharger Bearing Systems* [online]. 2011 [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <https://www.garrettmotion.com/news/newsroom/article/turbocharger-bearing-systems/>
- [8] POLICHRONIS, Dellis, Retzios EVAGGELOS, Geralis ALCIBIADES, Gasparakis ELIAS a Pesiridis APOSTOLOS. Turbocharger Lubrication - Lubricant Behavior and Factors That Cause Turbocharger Failure. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*. 2013. ISSN 2146-9067.
- [9] JÄÄSKELÄINEN, Hannu. *Turbocharger Bearings* [online]. 2016 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://www.dieselnets.com/tech/images/air/turbo/bearings/floating.jpg>
- [10] TANIMOTO, Kiyoshi, Kazuhisa KAJIHARA a Kunio YANAI. Hybrid Ceramic Ball Bearings for Turbochargers. In: *Hybrid Ceramic Ball Bearings for Turbochargers* [online]. Detroit, Michigan: SAE Transactions, 2000, s. 763–775. Dostupné z: [doi:10.4271/2000-01-1339](https://doi.org/10.4271/2000-01-1339)
- [11] HARTZELL ENGINE TECHNOLOGIES. *Ball Bearings in Turbochargers: Great for Cars. Not So Good for Aircraft*. [online]. 2016 [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: <https://hartzell.aero/ball-bearings-turbochargers-great-cars-not-good-aircraft/>
- [12] EDGAR JULIAN. *Turbo Revolution - The Coming Technologies Part 1* [online]. 2002 [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: [http://www.autospeed.com/cms/A\\_110993/printArticle.html](http://www.autospeed.com/cms/A_110993/printArticle.html)
- [13] BORCHERT, Uwe, Antonio DELGADO a Janusz A. SZYMCZYK. Development and Testing of Air Foil Bearing System for an Automotive Exhaust Gas Turbocharger. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2016, **831**(April), 71–80. Dostupné z: [doi:10.4028/www.scientific.net/amm.831.71](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.831.71)
- [14] DANIEL, Kueffner. Foil Air Bearings for High-Temperature Turbocharger Applications. *SoftInWay* [online]. [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: <http://blog.softinway.com/en/foil-air-bearings-for-high-temperature-turbocharger-applications/>

- [15] HEISLER, Heinz. *Advanced engine technology*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN 1-56091-734-2.
- [16] BELL, Corky. *Maximum Boost: Designing, Testing and installing Turbocharger Systems* [online]. USA: Bentley Publishers, 1997. ISBN 0-8376-0160-6. Dostupné z: [http://www.volkspage.net/technik/04/maximum\\_boost.pdf](http://www.volkspage.net/technik/04/maximum_boost.pdf)
- [17] LUBRICATION ENGINEERS, Inc. *Oil hose leaks* [online]. 97. 1996. Dostupné z: [https://www.lubricants.com/lit/techtips/097 Oil Hose LEaks.pdf](https://www.lubricants.com/lit/techtips/097%20Oil%20Hose%20LEaks.pdf)
- [18] NOVOTNÝ, Pavel. *Přednáška: pístní skupina*. 2018. [cit. 2019-3-17]
- [19] ŠTETINA, Josef. *Přednáška: Proudění plynů a par* [online]. 2018 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: [https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/458606/mod\\_label/intro/TT-JS2018-19Z-21-Proudeni.pdf](https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/458606/mod_label/intro/TT-JS2018-19Z-21-Proudeni.pdf)
- [20] MAN DIESEL SE. *AXIAL FLOW TURBINE TURBOCHARGER* [online]. [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <http://www.nauticexpo.com/prod/man-diesel-se/product-21500-234768.html>
- [21] MISÁREK, Dušan. *Turbokompresory*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [22] MARINE DIESELS. *Operational Information Turbocharging Principles and Construction* [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: [http://www.marinediesels.info/Turbocharging/turbocharger\\_principles.htm](http://www.marinediesels.info/Turbocharging/turbocharger_principles.htm)
- [23] EKOLUBE, S.r.o. *Popis automobilových maziv* [online]. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: [https://www.oleje.cz/obsah/automobilova\\_maziva](https://www.oleje.cz/obsah/automobilova_maziva)
- [24] HIMNI RACING, Inc. *Garrett GT3582R Ball Bearing Turbo - GT35R (600 HP)* [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <http://www.himni-racing.com/turbochargers/garrett-gt-dual-ball-bearing/garrett-gt3582r-ball-bearing-turbo-gt35r-600-hp>
- [25] KVV S.R.O. *Magnetické hriadelové spojky DST* [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <http://www.kvu-sk.com/produkty/magneticke-hriadelove-spojky-dst>
- [26] Škáromer [online]. [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://www.bazos.sk/img/1/346/98237346.jpg?t=1556861038>
- [27] HENNLICH S.R.O. *MATERIÁLY A TVRDOSTI* [online]. 2019 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://tesneni.hennlich.cz/produkty/o-krouzky-356/rozmerove-rady-o-krouzky.html>

## ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV

Obrázok 1.1 Cirkulácia vzduchu v pohonnej jednotke [2].....	12
Obrázok 1.2 Časti turbodúchadla [3].....	13
Obrázok 1.3 Detail difúzora a „volute“ v kompresorovej skrini [2] .....	14
Obrázok 1.4 Uloženie rotora v klzných ložiskách [1] .....	15
Obrázok 1.5 Charakteristika hydrodynamického mazania [6] .....	16
Obrázok 1.6 Rotujúce plávajúce puzdrá (hore) a zastavené plávajúce puzdrá (dole) klzného ložiska [9] .....	17
Obrázok 1.7 Znázornenie axiálnych tlakov pôsobiacich v turbodúchadle [2] .....	17
Obrázok 1.8 Axiálne klzné ložisko s popisom segmentu [1] .....	18
Obrázok 1.9 Guľôčkové ložisko s kosouhlým stykom [11] .....	19
Obrázok 1.10 Rez valivého ložiska [1] .....	19
Obrázok 1.11 Rez vzduchového ložiska [14].....	20
Obrázok 1.12 Závislosť teploty oleja a vzdialenosti od skrine turbíny, pre turbodúchadlo nechladené a chladené vodou [16].....	21
Obrázok 1.13 Separátor oleja a vzduchu s klzným ložiskom [8] .....	23
Obrázok 1.14 Prienik maziva cez piestne krúžky [18] .....	23
Obrázok 1.15 Mechanizmus prefuku vzduchu cez zámky krúžkov.....	24
Obrázok 1.16 Mechanizmus prefuku medzerou medzi krúžkom a drážkou hriadeľa.....	25
Obrázok 1.17 Detail nepravého labyrintu [21] .....	26
Obrázok 1.18 Detail pravého labyrintu [21].....	26
Obrázok 1.19 Použitie tesniaceho vzduchu v labyrintovom tesnení [22] .....	26
Obrázok 3.1 Odlúčenie oleja od zvyšku hriadeľa za krúžkami vplyvom odstredivých síl .....	32
Obrázok 3.2 Magnetická spojka firmy KVV s.r.o. [25] .....	32
Obrázok 3.3 Detail geometrie výstupkov v diere skrine (pozícia 1) a drážok na hriadeľi (pozícia 2). .....	33
Obrázok 3.4 Rozrezaná skriňa uložená v lícovaných skrútkách .....	33
Obrázok 3.5 Koncept masívnej skrine s otvormi pre vstup a výstup média .....	34
Obrázok 3.6 Mierky na meranie medzery [26].....	34
Obrázok 4.1 Zjednodušená geometria tesnenia rotora GT35 .....	35
Obrázok 4.2 Rez zostavy skúšobného mechanizmu.....	36
Obrázok 4.3 Znázornenie predpokladaného prechodu oleja cez hriadeľ .....	37
Obrázok 4.4 Podstava skúšobného mechanizmu.....	38
Obrázok 5.1 Schéma montáže skúšobného zariadenia.....	39
Obrázok 5.2 Pneumatická jednotka .....	40
Obrázok 5.3 Hydraulická jednotka (vľavo) so zásobníkom oleja (vpravo) .....	40
Obrázok 5.4 Snímač tlaku, pozícia: medzi piestnymi tesniacimi krúžkami.....	40
Obrázok 5.5 Natlačené krúžky na stene drážky pri axiálnom posuve hriadeľa smerom od vstupu .....	41
Obrázok 5.6 Hmotnostný prietokomer Red-y Industrial, GASOTECH s.r.o.....	42

**Zoznam Použitých Symbolov**

$\pi_c$	[-]	kompresný pomer
$w_z$	[N]	aplikované zaťaženie ložiska
$u_b$	[m·s <sup>-2</sup> ]	obvodová rýchlosť hriadeľa
$\eta_0$	[Pa·s]	viskozita maziva
$D$	[m]	vonkajší priemer tlmiča
$\delta$	[m]	radiálna vôľa tlmiča v prevádzke
$e$	[m]	excentricita tlmiča
$\dot{\gamma}$	[rad·s <sup>-1</sup> ]	uhlová rýchlosť tlmiča
$c$	[m]	radiálna vôľa vystredeného tlmiča
$\dot{m}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	hmotnostný tok
$\beta$	[-]	konštanta tlakového pomeru
$p$	[Pa]	tlak
$\kappa$	[-]	polytropický exponent
$\rho$	[kg·m <sup>3</sup> ]	hustota plynu
$A_E$	[m <sup>2</sup> ]	efektívny prierez
$\varphi$	[rad]	uhol
$h$	[m]	axiálna vôľa medzi krúžkom a drážkou pre krúžok
$U$	[m·s <sup>-1</sup> ]	radiálna rýchlosť krúžkov voči hriadeľu
$Q_V$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	objemový tok
$V$	[m <sup>3</sup> ]	objem
$t$	[s]	čas



## ZOZNAM PRÍLOH


**Príloha č. 1:** Cenová ponuka

**Príloha č. 2:** Výkresová dokumentácia

## Príloha č. 1: Cenová ponuka

JANO s.r.o.

NABÍDKA č. 19NA036

Dodavatel:  <b>JANO s.r.o.</b> <b>Mlýnská 65</b> <b>602 00 Brno 2</b>  IČ: 46972455 DIČ: CZ46972455 Telefon: 543212392 Fax: 543210616 E-mail: jano@jano.cz www.jano.cz		Odběratel: IČ: DIČ: <b>Matej Kuhajdik</b>  Tel.:	
Nabídka č.: 19NA036 Datum zápisu: 15.04.2019 Platno do:		Konečný příjemce:	

Nabízíme výrobu dílů:

Označení dodávky	Množství	J.cena	Sleva	Cena %DPH	DPH	Kč Celkem	
Skříň - 01	1 ks	11 050,00		11 050,00	0%	0,00	11 050,00
Hriadel' - 02	1 ks	6 900,00		6 900,00	0%	0,00	6 900,00
Príruba - 03	1 ks	7 100,00		7 100,00	0%	0,00	7 100,00
Mierka - 04	1 ks	3 900,00		3 900,00	0%	0,00	3 900,00
Podstavec - 05	2 ks	2 700,00		5 400,00	0%	0,00	5 400,00
Vaňa - 06	1 ks	3 350,00		3 350,00	0%	0,00	3 350,00
Součet položek				37 700,00		0,00	37 700,00
<b>CELKEM K ÚHRADĚ</b>							<b>37 700,00</b>

Doba dodání je cca 5 – 8 týdnů od objednání.

Vystavil: Sedlák  
sedlak@jano.cz

Ekonomický a informační systém POHODA

**Príloha č. 2: Výkresová dokumentácia**

Kompletná výkresová dokumentácia je súčasťou samostatných dosiek.

Zostava .....	č. výkresu: 2-BP-01-00
Skriňa.....	č. výkresu: 3-BP-01-01
Hriadel'.....	č. výkresu: 3-BP-01-02
Príruba .....	č. výkresu: 3-BP-01-03
Mierka.....	č. výkresu: 3-BP-01-04
Podstavec.....	č. výkresu: 3-BP-01-05
Vaňa.....	č. výkresu: 3-BP-01-06

